

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

FAKULTA STAVEBNÍ



**DIPLOMOVÁ
PRÁCE**

2018

BC. ZDENĚK SOUKUP

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STAVEBNÍ

Katedra materiálového inženýrství a chemie

VYBRANÉ VLASTNOSTI ALKALICKY AKTIVOVANÉHO CIHELNÉHO PRACHU

SELECTED PROPERTIES OF ALCALI-ACTIVATED BRICK
POWDER



Diplomová práce

Bc. Zdeněk Soukup

vedoucí práce: doc. Ing. Eva Vejmelková, Ph.D.

Praha, 2018



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Tháškova 7, 166 29 Praha 6

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Soukup Jméno: Zdeněk Osobní číslo: 410142
Zadávající katedra: K 123
Studijní program: Stavební inženýrství
Studijní obor: Budovy a prostředí

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Vybrané vlastnosti alkalicky aktivovaného cihelného prachu.
Název diplomové práce anglicky: Selected Properties of Alkali-activated Brick Powder
Pokyny pro vypracování:
Rešerše na alkalickou aktivaci materiálů
Nastudování experimentálních metod
Provedení experimentálního programu
Zpracování a vyhodnocení výsledků
Diskuse k dosaženým výsledkům a formování závěrů

Seznam doporučené literatury:
Databáze WOS, Alkali-Activated Cements and Concretes

Jméno vedoucího diplomové práce: doc. Ing. Eva Vejmelková, Ph.D.
Datum zadání diplomové práce: 9.10.2017 Termín odevzdání diplomové práce: 8.1.2018
Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku

Podpis vedoucího práce Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, pouze za odborného vedení vedoucího doc. Ing. Evy Vejmelkové, Ph.D.

Dále prohlašuji, že veškeré podklady, ze kterých jsem čerpal, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

V Praze dne 8.1.2018

.....
podpis

Poděkování

Rád bych zde poděkoval vedoucí mé diplomové práce doc. Ing. Evě Vejmelkové, Ph.D za její odborné vedení, gramatické úpravy a cenné rady. Dále bych poděkoval všem z Katedry materiálového inženýrství a chemie, kteří se nějakým způsobem podíleli na řešení mé diplomové práce. V neposlední řadě bych rád poděkoval rodině, blízkým a přátelům za jejich podporu a přízeň.

Anotace:

Cílem této práce bylo stanovit vhodné složení alkalicky aktivované směsi za použití cihelného prachu, který vzniká jako odpadní materiál při výrobě cihelných tvarovek. V rámci výzkumu byly použity dva typy cihelných prachů, první pochází z Hevlínské a druhý z Libochovické provozovny. U obou těchto prachů byly prokázány dobré pucolánové vlastnosti. Cihelný prach byl proset na velikost zrn pod 1 mm. Z každého prachu bylo vyrobeno celkem 7 různých směsí. U vyrobených vzorků byly studovány základní fyzikální, strukturní a mechanické vlastnosti. Jednotlivé výsledky byly vyhodnoceny a vybrané vlastnosti materiálů vyrobených z obou typů cihelných prachů byly mezi sebou porovnány.

Klíčová slova:

geopolymery, alkalická aktivace, cihelný prach, základní fyzikální vlastnosti, mechanické vlastnosti, charakteristika pórového systému, mikrostruktura

Abstract:

The goal of this work was to set suitable composition of alcalic mixture using the bricks dust. The bricks dust arises as waste material by producing special shaped brick. Within research were used two types of bricks dust. The first was from Helvin workshop and the second from Libochovice workshop. By both of these dusts were proved good puzzolano qualities. The bricks dust was sifted on size under 1mm. From every kind of dust was made seven different mixtures. At every sample were studied elementary physical, structural and mechanical quality. Individual results were evaluated. Selected qualities of material made from both type of dust were compared.

Keywords:

geopolymers, alkali activation, brick dust, basic physical properties, mechanical properties, characteristics of the pore system, microstructure

Obsah

Seznam použitých symbolů.....	3
1 Úvod.....	4
2 Historie geopolimerů.....	5
2.1.1 Mezopotámie.....	5
2.1.2 Egypt	5
2.1.3 20. století.....	6
3 Geopolymery a geopolimerizace	7
3.1 Geopolymery	7
3.2 Geopolimerizace	9
3.2.1 Geopolymery.....	11
3.3 Vybrané parametry ovlivňující geopolimerizaci (alkalickou aktivaci).....	12
3.3.1 Teplota vytvrzování.....	12
3.3.2 Doba vytvrzování	12
3.3.3 PH.....	12
3.3.4 Kalcinace	13
3.3.5 Koncentrace alkálií.....	13
3.4 Materiály vhodné pro alkalickou aktivaci	13
3.4.1 Struska	13
3.4.2 Popílek.....	15
3.4.3 Metakaolin	17
3.4.4 Bentonit	21
3.4.5 Cihelný odpad	22
3.5 Vlastnosti geopolimerů.....	25
4 Experimentální metody měření	25
4.1 Základní fyzikální vlastnosti	25
4.1.1 Gravimetrická metoda	25
4.1.2 Pyknometrická metoda	27
4.2 Struktura materiálu (Porozimetrie)	27
4.3 Mechanické vlastnosti	28
4.3.1 Pevnost v tlaku	28
4.3.2 Pevnost v tahu za ohybu	29

5	Experimentální část	29
5.1	Použité směsi	30
5.1.1	Směsi typu A (rozdílné Ms).....	30
5.1.2	Směsi typu B (stejně Ms).....	30
5.2	Charakteristika použitých surovin	31
5.2.1	Cihelný prach	31
5.2.2	Hydroxid sodný.....	35
5.2.3	Vodní sklo.....	36
5.2.4	Voda	37
5.3	Pracovní postup.....	38
6	Experimentální výsledky	38
6.1	Základní fyzikální vlastnosti	39
6.1.1	Směsi typu A.....	39
6.1.2	Směsi typu B.....	45
6.2	Struktura materiálu.....	53
6.2.1	Směsi typu A.....	53
6.2.2	Směsi typu B.....	55
6.3	Mechanické vlastnosti	59
6.3.1	Směsi typu A – Hevlínský cihelný prach	59
6.3.2	Směsi typu A – Libochovický cihelný prach.....	62
6.3.3	Směsi typu B – Hevlínský cihelný prach.....	64
6.3.4	Směsi typu B – Libochovický cihelný prach.....	67
6.4	Porovnání vybraných vlastností.....	70
6.4.1	Směsi typu A.....	70
6.4.2	Směsi typu B.....	73
7	Závěr	77
	Literatura	79
	Seznam obrázků.....	83
	Seznam tabulek.....	86

Seznam použitých symbolů

V	[m ³]	objem
ρ	[kg/m ³]	objemová hmotnost
ρ_w	[kg/m ³]	hustota vody
ρ_{mat}	[kg/m ³]	hustota pevné matrice
m_d	[kg]	hmotnost vysušeného vzorku
m_w	[kg]	hmotnost plně nasyceného vzorku
m_a	[kg]	Archimedova hmotnost
T	[°C]	teplota
ψ_o	[%]	otevřená pórovitost
F	[N]	zatěžovací síla
A	[mm ²]	zatěžovací plocha
R_m	[MPa]	pevnost v tlaku
R_f	[MPa]	pevnost v tahu za ohybu
b, h	[mm]	rozměry vzorku
l	[mm]	osová vzdálenost podpor
Ms	[-]	silikátový modul

1 Úvod

Geopolymery nebo také alkalicky aktivované materiály jsou hmoty, které se v historii naší planety vyskytují již od doby starověku, např. staří egypťané s tímto materiálem již pracovali, ovšem ne v takové podobě, jak jej známe v dnešní době. Jedná se o materiál, který je svým vzhledem podobný přírodnímu kameni, ale svými vlastnostmi ho může v některých ohledech i značně převýšit. Mezi tyto vlastnosti patří např. požární odolnost, trvanlivost nebo mechanické vlastnosti.

Geopolymery jsou aluminosilikátové materiály, které vznikají alkalickou aktivací vstupního materiálu v silně zásaditém prostředí. Pro alkalickou aktivaci může být použita jakákoliv surovina s pucolánovými vlastnostmi. Mohou to být materiály, které vznikají záměrně nebo jako odpad v průmyslové výrobě. Mezi tyto materiály patří např. cihelný prach, struska, popílek a jiné. Využití těchto materiálů má velký energetický a ekonomický potenciál. Jejich výroba je méně energeticky náročná než výroba např. portlandského cementu. Jedná se tedy o materiály, které jsou šetrné i k životnímu prostředí, protože při jejich výrobě vzniká menší množství emisí CO_2 než při výrobě cementu.

Cílem této práce bylo studium alkalicky aktivovaného materiálu vyrobeného z cihelného prachu, který vzniká jako odpadní materiál při výrobě cihelných tvarovek. Byly použity dva různé cihelné prachy získané od společnosti Heluz cihlářský průmysl v.o.s. První cihelný prach pochází z výroby v Hevlíně, která se nachází v Jihomoravském kraji. Druhý pochází z Libochovické výroby, která se nachází v Ústeckém kraji. Oba cihelné prachy prokázaly dobré pucolánové vlastnosti. Oba prachy byly v rámci studie prosety na velikost zrn pod 1 mm. Pro alkalickou aktivaci směsí bylo použito vodní sklo a hydroxid sodný v p.a. kvalitě. Bylo sledováno celkem 7 směsí, jejichž receptury vznikly ve spolupráci s prof. Pavlou Rovnaníkovou z VUT v Brně. U vybraných směsí byl zkoumán vliv teploty v rozmezí od 20 do 80 °C po dobu 1 týdne na jejich zrání. Po 1 týdnu byly vzorky vyndány z klimatické komory a byly ponechány v laboratorních podmínkách při teplotě 20 °C. Po 28 dnech od vyrobení byly u vzorků zkoumány základní fyzikální a mechanické vlastnosti. Jednotlivé výsledky byly mezi sebou následně porovnány.

Získané hodnoty z této studie mohou přispět k výzkumům, které se problematikou a využitím geopolimerů v současné době zabývají.

2 Historie geopolimerů

Podle vědeckých výzkumů se geopolymerní materiály používaly již v době starověku, ale poněkud v odlišné formě, než jak je známe v době současné. V této kapitole jsou uvedeny některé historické příklady, kdy se objevily geopolymery.

2.1.1 Mezopotámie

Přibližně od roku 3000 před naším letopočtem na území dnešního Iráku žily národy Summerů a Akkadů, které kolem svých staveb budovaly mohutné hradby s cimbuřím a budovaly také stavby zvané zikkuraty. Tyto stavby se pro nedostatek kamene stavěly převážně z cihel. Problém ovšem nastával v souvislosti s výrobou cihel. V této oblasti byl veliký nedostatek dřeva na roztopení pecí, které sloužily pro vypalování cihel. Vyskytoval se zde pouze rákos a datlové palmy. Z tohoto důvodu bylo potřeba se zabývat jinou technologií výroby cihel, která nevyžadovala pro výrobu vysoké teploty.

Cihelná stavba zikkuratu v Uru je přibližně pět tisíc let stará. Je možné, že cihly pro výstavbu této stavby nebyly vyráběny tepelným zpracováním (pro nedostatek dřeva), ale byl použit chemický proces, neboli geopolimerace.

Zdrojovými surovinami pro chemicky syntetizovanou hmotu mohly být např. popel spalovaných rostlin a rákosí, který obsahoval alkálie, vápník a hořčík.

U zlomků cihel byla zjištěna jak amorfni struktura, tak i vláknitá, silikátová struktura. To lze považovat za důkaz toho, že cihly nebyly páleny, ale chemicky aglomerovány jako jsou podobným způsobem v dnešní době tvořeny geopolymerní materiály [1].

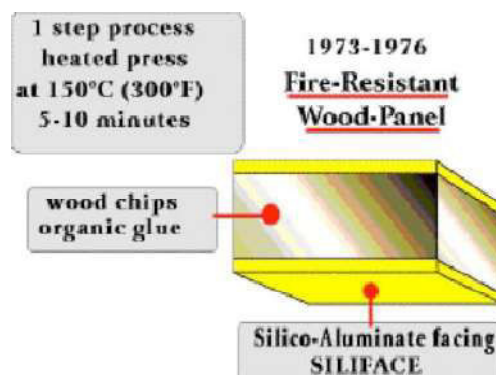
2.1.2 Egypt

Je mnoho teorií, jak mohly vzniknout pyramidy. Velké množství těchto teorií je založeno na principu tesání a tahání kamene. Problém ovšem mohl nastat v souvislosti s těžbou, opracováním a přepravou tak velkých kamenných bloků. Odpověď by mohla přinést teorie prof. Josepha Davidovitse, podle kterého tyto stavební bloky byly zkonstruovány pomocí aglomerovaného vápence. Tato stavební hmota byla na bázi vápence, která se odlévala do

dřevěného bednění přímo v místě staveniště. Tento umělý vápenec vznikl geochemickou reakcí [1,2].

2.1.3 20. století

Od dob starověku byl výzkum v oblasti geopolymérů v útlumu. V letech 1970 – 1973 byla oblast Francie sužována katastrofickými požáry. Ty se snáze šířily kvůli hořlavým vlastnostem plastových materiálů, které se ve značném množství v té době používaly. V této souvislosti bylo potřeba vyvinout takový materiál, který by nepodporoval šíření požárů. Mezi roky 1972 a 1976 byly vyvinuty požárně odolné dřevoštěpkové desky složené z dřevěného jádra a vnější vrstvy z SILIFACE Q nanokompozitního nátěru, který byl požárně odolný [1, 2, 3].



Obr. 1: Výroba ohnivzdorných dřevotřískových desek [3]

V letech 1977 – 1982 byla vyvinuta technologie nízkoteplotní geopolymerní fúze (L. T. G. S.). Při této technologii schla vzniklá směs již při teplotách 50°C až 250°C. Vzniklý materiál byl odolný vůči vodě a vykazoval vysoké mechanické vlastnosti.



Obr. 2: Cihla vyrobená technologií L.T.G.S. [3]

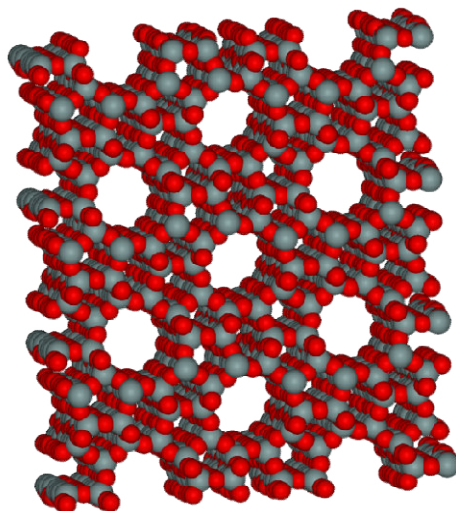
V roce 1983 se začaly vyvíjet jedny z prvních vysocepevnostních geopolymerních pojiv a cementy založené na hydraulických a geopolymerních bázích. Bylo objeveno, že při přidání mleté vysokopecní strusky do směsi se zrychlí čas zrání a u daných pojiv se zlepší pevnost v tlaku a ohybu.

V letech 1987 – 2000 byl vypsan konkurz na výzkum a vývoj kompozitního materiálu pro letecký průmysl. Pro své protipožární vlastnosti byly geopolymery jednou z možných alternativ. Připoužití tohoto materiálu v letectví bylo zajištěno více času na únik pasažérům z letadel při leteckých nehodách [1, 2, 3].

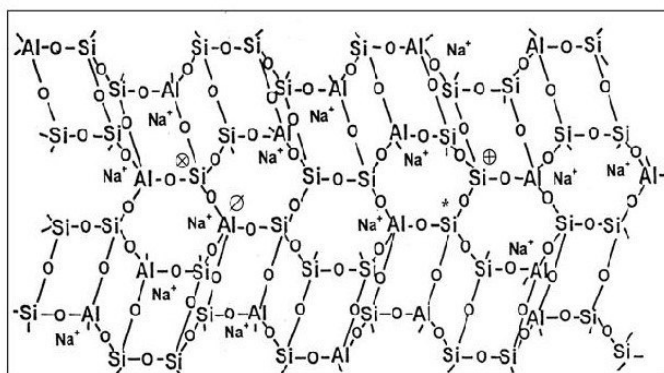
3 Geopolymery a geopolymerizace

3.1 Geopolymery

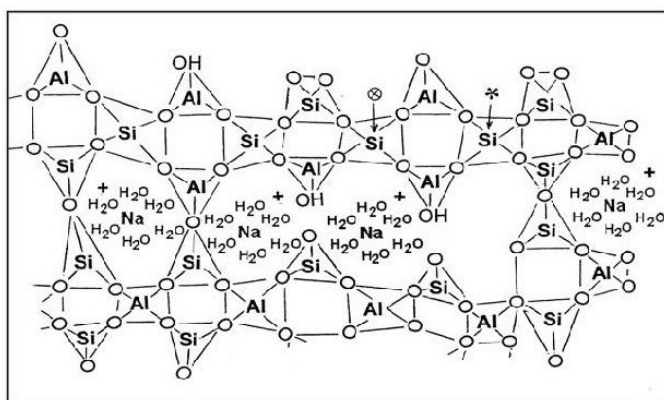
Pojem geopolymer zavedl profesor Davidovits v sedmdesátých letech minulého století a lze si pod ním představit anorganické uměle vyrobené materiály, které vznikají reakcí základních hlinito-křemičitých minerálů v silně zásaditém prostředí za normální teploty a tlaku. Tato reakce se označuje jako geopolymerizace. Geopolymerní pojiva patří do skupiny minerálních pojiv blízké příbuzných přírodním zeolitům. Hlavní rozdíl je v jejich charakteru, zatímco zeolity jsou krystalické, geopolymery mají rentgeno amorfni charakter [1, 2, 4, 5, 6, 7].



Obr. 3: Struktura zeolitů [4]

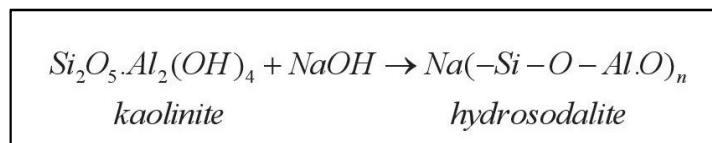


Obr. 4: Struktura geopolymery podle Davidovitse [5]



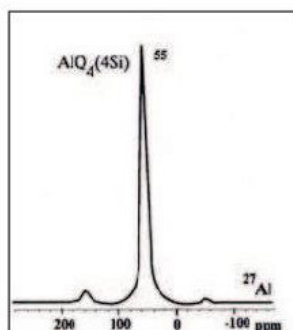
Obr. 5: Současný pohled na strukrutu geopolymérů [5]

Profesor Davidovits definuje geopolymery jako materiál pocházející z anorganické polykondenzace, tzn. geopolymery v důsledku alkalické aktivace alumosilikátových látek.



Obr. 6: Definice geopolymérů [6]

Podle profesora Davidovitse musí geopolymery striktně splňovat definici, kde ^{27}Al NMR spektra musí mít pík při 55 ppm, Al smí být přítomen ve struktuře pouze v koordinaci 4. Této definici vyhovují pouze látky vzniklé alkalickou aktivací čistého metakaolinu. Jinak to nesmí být nazýváno jako geopolymery, nýbrž pouze alkalicky aktivované látky.



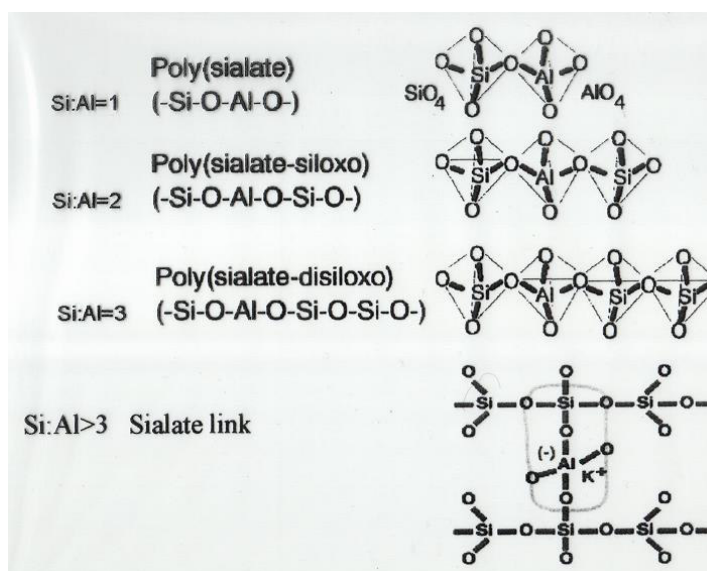
Obr. 7: ^{27}Al NMR spektrum geopolymery [5]

Pokud se nebudeme držet definice profesora Davidovitse v souvislosti s čistým metakaolinem, je možné použít pro přípravu geopolymérů velké množství výchozích surovin, a to přírodních, uměle vyrobených, ale i odpadních materiálů z průmyslové výroby. Geopolymery se vyznačují výjimečnou teplotní stabilitou, dobrou chemickou odolností a výbornými mechanickými vlastnostmi [1, 2, 4, 5, 6, 7].

3.2 Geopolymerizace

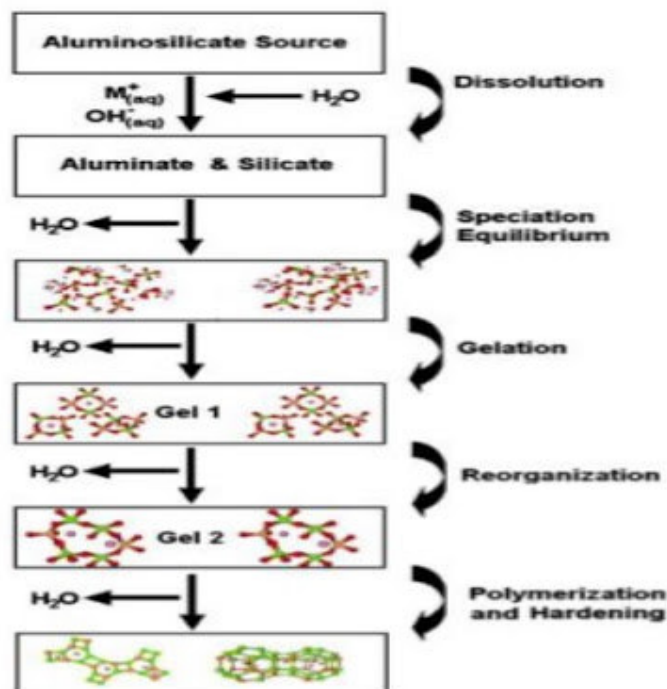
Geopolymerizace je reakce alumosilikátového materiálu s alkalickým roztokem s vysokou koncentrací OH^- iontů, která se odehrává v prostředí s pH větším než 12. Na počátku tvorby

geopolymerů je alkalická hydrolyza sloučenin s kyslíkovými můstky mezi jednotlivými polyedry SiO_4^{4-} a AlO_4^{4-} . Tato tvorba je spojená s rozpouštěním aluminosilikátů v silně zásaditém prostředí. Rozpouštění je poměrně rychlé, což vede k rychlému vytvoření přesyceného roztoku obsahujícího monomerní složky $[\text{Al}(\text{OH})_4]^-$, $[\text{SiO}(\text{OH})_3]^-$ a $[\text{SiO}_2(\text{OH})_2]^{2-}$. Tyto složky mezi sebou kondenzují a vytvářejí aluminosilikátový gel, který následně vede k tvorbě nových aluminosilikátových sloučenin, jejichž struktura je závislá na celkovém poměru Si:Al.



Obr. 8: Struktura geopolymerů podle Davidovitse [6]

Důležitá je přítomnost iontu alkalického kovu vyrovnávající záporný náboj, který se vytvoří na atomu kyslíku [1, 2, 5, 6, 7, 8].



Obr. 9: Proces geopolymerace [8]

3.2.1 Geopolymery

Geopolymery nebo také alkalicky aktivované materiály lze charakterizovat jako materiály na rozhraní mezi klasickými hydratovanými anorganickými pojivy, skelnými a keramickými materiály.

Alkalická aktivace aluminosilikátů je odlišný proces od hydratace anorganických pojiv. Probíhá ve třech krocích, přičemž každý krok může postupovat různými způsoby, což vede k rozdílným výsledkům vzniklých produktů.

V prvním kroku je aluminosilikátové sklo rozpuštěno v silně alkalickém roztoku, který podporuje formování zeolitických prekurzorů z rozpuštěných částec (nuklidů). Volné ionty se přeorientovávají, vytvářejí shluky. Po dosažení kritické velikosti nuklidů začíná růst krystalů. Malé molekuly se spojí ve velké molekuly, které se následně srazí ve formě amorfního gelu s minoritními krystalickými fázemi. Vzniklý geopolymer je dvojrozměrného až trojrozměrného charakteru a lze jej popsat obecným vzorcem:



Fáze CSH a CAH mohou také vzniknout v závislosti na složení výchozích materiálů a na podmínkách reakce. V průběhu těchto reakcí může vzniknout i sekundární voda. Amorfni, částečně amorfni nebo krystalické látky mohou vznikat v závislosti na charakteru výchozích surovin a podmínkách reakce. Koncentrace pevné hmoty hraje významnou roli v procesu alkalické aktivace [1, 2, 5, 7].

3.3 Vybrané parametry ovlivňující geopolymerizaci (alkalickou aktivaci)

3.3.1 Teplota vytvrzování

Zvýšená teplota při vytvrzování má u geopolymerů pozitivní dopad na mechanické vlastnosti materiálu, konkrétně na pevnost v tlaku.

3.3.2 Doba vytvrzování

Vytvrzování při zvýšené teplotě (v rozmezí 30 °C až 90 °C) má významný podíl na geopolymerní reakci. Delší doba zrání při zvýšené teplotě (více jak 1 hodina) zlepšuje polymerizační proces, což vede ke zlepšení pevnosti tlaku. Zvýšení teploty podporuje rozpouštění reaktivních látek, především strusky a popílku.

Dlouhodobé vytvrzování při zvýšené teplotě vede k rozbití struktury geopolymerů. Výsledkem je dehydratace a nadměrné smršťování materiálu [9].

3.3.3 PH

Hodnota pH má jeden z nejvýznamnějších vlivů, který se podílí na konečné tlakové pevnosti geopolymerního materiálu. S rostoucím pH viskozita, nebo-li tekutost, směsi klesá. Při nižších hodnotách pH vykazuje směs konzistenci srovnatelnou s konzistencí cementové pasty. Pro geopolymerní materiály je optimální hodnota pH 13 – 14, při které mají směsi dobrou zpracovatelnost a současně lepší mechanické vlastnosti než při nižších hodnotách pH [9].

3.3.4 Kalcinace

Kalcinovaný zdrojový materiál, jako je popílek, struska a metakaolin vykazují při geopolymeraci vyšší reaktivitu. Kalcinace aktivuje materiál tím, že mění svou krystalickou strukturu do amorfní struktury pro ukládání dodatečné energie. Tím se zvýší jejich aktivita a dochází ke zvýšení pevnosti v tlaku. Kalcinace také ovlivňuje uvolňování Al a Si ze zdrojového materiálu. Obsah CaO se při kalcinaci zvyšuje. Vysoký obsah CaO snižuje pórovitost a posiluje tvorbu amorfní struktury gelu během geopolymerace. Mezi kalcinované materiály patří např. popílek, struska nebo metakaolin [9].

3.3.5 Koncentrace alkálií

Rozpusťnost aluminosilikátů se zvyšuje se zvyšující se koncentrací hydroxidových iontů. Při vyšší koncentraci NaOH dochází k nárůstu mechanických vlastností materiálu. Zvyšující se koncentrace alkálií dále zvyšuje požární odolnost. Bylo zjištěno, že přídavek K_2O snižuje výskyt trhlin. Vysoký přídavek NaOH zrychluje chemické rozpouštění, ale omezuje tvorbu ettringitu a portlanditu během hydratace pojiva. Při snížení tvorby portlanditu se u materiálu zvyšují pevnosti a dochází také ke zvýšení trvanlivosti materiálu [9].

3.4 Materiály vhodné pro alkalickou aktivaci

Pokud se nebudeme držet definice profesora Davidovitse, jak již bylo zmíněno v kapitole 3.1, je možné použít pro přípravu geopolymerů velké množství surovin, které vznikají v průmyslové výrobě, ať již záměrně, nebo jako odpadní materiál. Jako základní materiál může být použita jakákoliv anorganická surovina s pucolánovými vlastnostmi, která obsahuje silikáty nebo aluminosilikáty.

Využití těchto materiálů má velký energetický i ekonomický potenciál. Mezi tyto materiály patří např. struska, popílek, metakaolín, bentonit, keramický odpad a jiné [1, 2, 5, 7].

3.4.1 Struska

Struska je hrubozrnný materiál černé barvy s ostrými hranami a skelným leskem. Tento materiál vzniká během výroby oceli, tavení a rafinací kovů, spalování uhlí, různých odpadů, dřevní hmoty nebo zcela spontánně při vývěru lávy.



Obr. 10: Struska [10]

Struska patří mezi latentně hydraulická pojiva, u kterých je potřeba pro aktivaci pojivových schopností použít aktivátor, například vodní sklo s upraveným silikátovým modulem. Reaktivnost strusky je podmíněna jejím chemickým a fázovým složením. Důležitý je sklovitý charakter, toho se docílí rychlým ochlazením strusky, nejlépe ve vodě. Pro účely alkalické aktivace je potřeba co nejmenší zrno, proto se struska mele na jemnost 310 až 350 m².kg⁻¹.

V praxi byl proveden experimentální výzkum s použitím strusky s různým chemickým složením.

Označení strusky	$\Sigma \text{CaO} + \text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ (hm.%) dle tab. 1	Přepočítané složení (hm.%)			Potenciální rovnovážná fázová asociace
		CaO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	
I	63,97	16,30	11,93	71,77	CS-S-CAS ₂
II	69,18	19,36	11,48	69,17	
III	76,90	26,61	11,52	61,87	
IV	74,94	22,67	11,80	65,53	

Obr. 11: Zjednodušené chemické složení a potenciální fázové složení strusek [11]

Výsledkem experimentálního výzkumu bylo zjištění, že strusky, které jsou produktem redukce kovů z hrubých konvertorových kalů, vykazují po rychlém ochlazení latentní hydraulické vlastnosti. Materiály ze samotných strusek I a III vykazují pevnost v tlaku po 28 dnech hydratace do 25 MPa. Granulované vysokopecní strusky dosáhly vyšších pevností po alkalické aktivaci [10, 11, 12].

3.4.2 Popílek

Popílek je odpadní produkt energetického průmyslu a vzniká při spalování práškového antracitu, černého nebo hnědého uhlí. Je zachycován v odlučovačích ze spalín v tepelných elektrárnách. Podle místa odloučení ze spalín lze popílek rozdělit na hrubší nebo jemnější.



Obr. 12: Popílek [13]

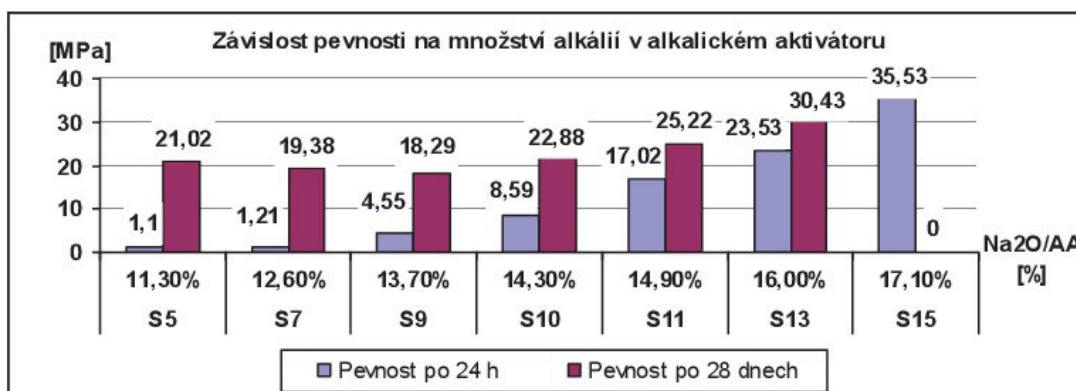
Jedním ze směrů může být využití popílku pro alkalickou aktivaci. Nejvýznamnějším faktorem pro využití popílku při alkalizaci je přítomnost vhodně modifikovaných hlinitokřemičitanů. Jejich modifikace nastává v procesu spalování uhlí a je závislá na technologii spalování, konkrétně na teplotě během spalování. V současné době se setkáváme se dvěma technologiemi spalování, které se od sebe liší typem použitého ohniště a provozními teplotami. První skupinou je klasické spalování, do kterého patří roštová nebo prášková ohniště. Druhou skupinou jsou ohniště s fluidním spalováním. Obě skupiny se od sebe liší teplotou spalování. U klasického spalování se teplota spalín pohybuje nejčastěji v rozmezí 1100 až 1500 °C. U fluidních kotlů se mleté uhlí spaluje s přídavkem vápence jako sorbentu při relativně nízké teplotě 800 až 850 °C, která je optimální pro absorpci oxidu siřičitého vznikajícím vápnem.

Nejběžnější minerály	Fáze vytvořené po spalování		
	850°C	1500°C	1800°C
Křemen	Křemen	Krystobalit	Skelná fáze
Kaolinit	Metakaolin	Skelná fáze + mulit	Skelná fáze
Illit	Illit	Skelná fáze + mulit	Skelná fáze
Kalcit	CaO	Skelná fáze	Skelná fáze

Obr. 13: Fáze přítomné v popílcích po spalování [14]

Z obr. 13 je zřejmé, že teplota v procesu spalování uhlí má veliký vliv na přítomnost reaktivních fází v popílku. V případě fluidního spalování je v popílku přítomen vysoce reaktivní metakaolín, který vzniká teplotní modifikací kaolínu při teplotě kolem 800 °C. Se vzrůstající teplotou dochází k tvorbě skelné fáze z původních hlinitokřemičitanů a k tvorbě mulitu, který je nereaktivní. Lze tedy říci, že pro alkalickou aktivaci je vhodné použití popílku, který vzniká při procesu fluidního spalování. Popílek, který vzniká při klasickém spalování, lze také použít pro alkalickou aktivaci, musí být ale použit jiný zdroj hlinitokřemičitanů.

V praxi byl proveden výzkum zabývající se zkoumáním popílku, který vzniká při klasickém spalování, tedy při teplotách v rozmezí 1100 až 1500 °C. Během experimentu byla vyrobena řada vzorků. Směs se skládala z popílku, roztoku vodního skla a hydroxidu sodného. Proměnným faktorem bylo množství hydroxidu sodného v roztoku vodního skla. U vzorků byla zkoušena pevnost v prostém tlaku. Na obr. 14 lze pozorovat patrný nárůst pevnosti v čase s rostoucím množstvím Na_2O , hlavně v počáteční fázi [13, 14, 15, 16].



Obr. 14: Porovnání vývoje pevnosti v tlaku vzorků v závislosti na množství Na_2O [14]

3.4.3 Metakaolin

Metakaolin je nehydroxylová forma jílového minerálního kaolinitu. Velikost částic metakaolinu je menší než cementové částice, ale není tak jemné jako výpary oxidu křemičitého. Kvalita a reaktivita metakaolinů je silně závislá na vlastnostech použité suroviny. Může být vyráběn z různých zdrojů obsahujících kaolinit, např. vysoce čistých kaolinitových nánosů nebo kaolinitových usazenin.

Metakaolin vzniká dehydroxylací kaolinitu, což je endotermický proces, při kterém dochází ke spotřebování velkého množství energie potřebné k odstranění chemicky vázaných hydroxilových iontů. Optimální aktivační teplota dehydroxilace se pohybuje v rozmezí 550 až 850 °C, avšak nejčastěji se uvádí 650 až 750 °C. Přehřátím kaolinitu může nastat proces slinování za vzniku nereaktivního žáruvzdorného materiálu obsahující mulit [17, 18, 19, 20, 21, 22].



Obr. 15: Metakaolin [18]

Metakaolin může pozitivním způsobem ovlivnit některé vlastnosti vzniklých materiálů, např. zvýšení pevnosti v tlaku a ohybu, snížení vzniku výkvětů, zvýšení trvanlivosti, zvýšení chemické odolnosti a jiné.

Vlastnosti geopolymery na bázi metakaolinu jsou přímo ovlivněny nejen specifickým povrchem a složením metakaolinu, typem, složením a relativním množstvím použitého alkalického aktivátoru, ale závisí také na podmínkách během počátečního období geopolymerační reakce.

V praxi byla provedena studie, která se zabývala analýzou vlivu teploty na vytvrzování a jejím vlivem na mechanické vlastnosti, resp. pevnost v tlaku a pevnost v ohybu, v průběhu času. Byly provedeny dva pokusy. Při prvním experimentu byly vzorky vytvrzeny při teplotách od 10 do 80 °C. Jedna sada vzorků byla skladována při teplotě 20 °C a byla

považována za referenční. Jeden vzorek byl uložen v lednici při teplotě 10 °C, další vzorky byly uloženy při teplotách 40, 60 a 80 °C v klimatické komoře bezprostředně po odlití. Po 4 hodinách byly vyjmuty z klimatické komory (z lednice) a skladovány při teplotě okolí (20 °C) a relativní vlhkosti $45 \pm 5\%$ až do testování, viz obrázek 16. Druhý experiment byl zaměřen na účinek různých vytvrzovacích časů při zvýšených teplotách. Vzorky byly uloženy v klimatické komoře po dobu 1, 2, 3 a 4 hodin při teplotě 40, 60 a 80 °C.

Experimentální studie vedla k závěru, že teplota má zásadní vliv na vytvrzování geopolymérů na bázi metakaolinu. Hodnocené mechanické vlastnosti, jak počáteční hodnoty, tak konečné, jsou velmi závislé na vytvrzovací teplotě. Vyšší teploty při vytvrzování zvyšují mechanické vlastnosti, které mohou dokonce dosáhnout cílové hodnoty již do 1 dne, ovšem po 28 dnech byly výrazně nižší než ty, které byly ošetřeny při laboratorní nebo snížené teplotě. Lze tedy konstatovat, že urychlení vytvrzování teplotou nevede ke kvalitnější výrobě. Navíc, vliv teploty závisí na době vytvrzování. Vytvrzování 1 hodinu při zvýšené teplotě nezpůsobilo výrazné změny v nárůstu pevnosti. Delší doba vytvrzování při zvýšené teplotě vedla ke zrychlení reakce a ke zvýšení pevnosti již v počátečním stádiu, viz obr. 17 [17, 18, 19, 20, 21, 22].

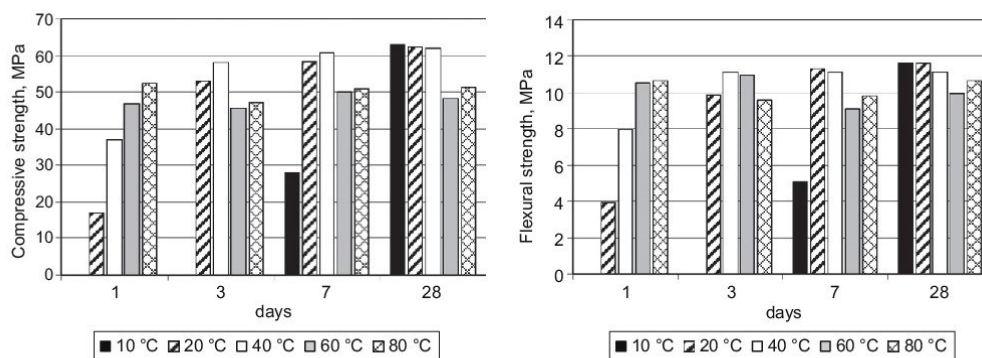


Fig. 2. Development of compressive and flexural strength of geopolymer material cured at 10, 20, 40, 60 and 80 °C over time (1, 3, 7, and 28 days). Curing at 40, 60 and 80 °C was carried out for initial 4 h.

Obr. 16: Vývoj mechanických vlastností geopolymerního materiálu vytvrzeného v čase [21]

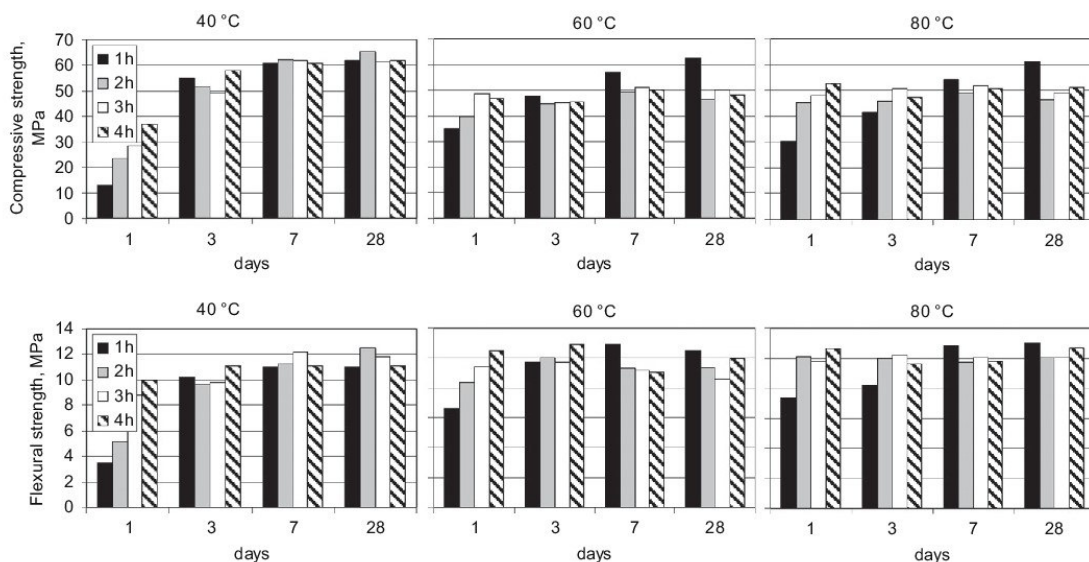
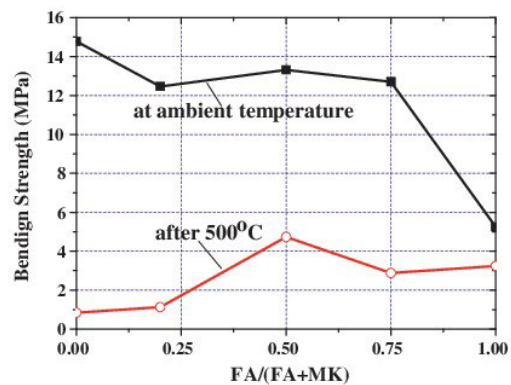


Fig. 3. Influence of curing time on compressive and flexural strengths of geopolymer cured at elevated temperatures (40, 60 and 80 °C).

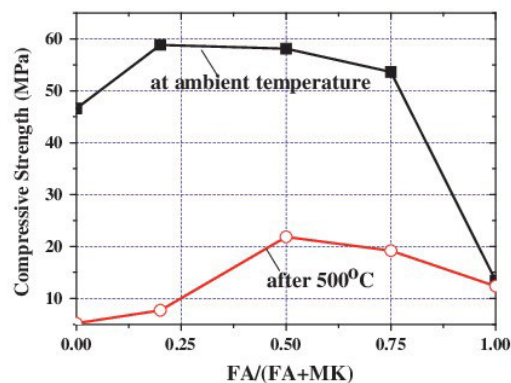
Obr. 17: Vliv doby vytvrzování na mechanické vlastnosti geopolymery vytvrzeného při zvýšených teplotách [21]

Metakaolin (MK) byl také v praxi experimentálně testován v kombinaci s popílkem (FA) pro využití v oblasti požární ochrany. Experiment byl proveden ve třech etapách, v první fázi experimentu se prováděla optimalizace mezi poměrem metakaolinu a popílku. V druhé fázi se testovala optimální směs ve formě pasty, malty a betonu při zvýšených teplotách. V třetí etapě se provedly testy na portlandském cementu, z něhož byly zhotoveny vzorky a jejich vlastnosti se porovnávaly s vlastnostmi geopolymerních vzorků. Na základě výsledků dosažených

v 1. etapě byl stanoven optimální podíl metakaolinu a popílku 50%, viz obr. 18.



(a) Bending strength

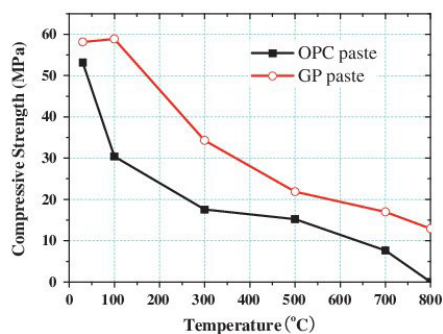


(b) Compressive strength

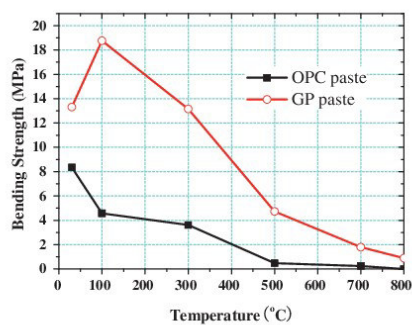
Fig. 1. Effect of FA content on bending and compressive strength of geopolymer pastes.

Obr. 18: Vliv obsahu popílku na ohyb a pevnost v tlaku geopolymerní pasty [22]

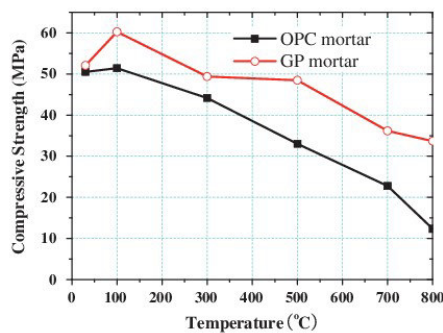
V druhé fázi zkoumání byly vzorky vystaveny teplotám v rozmezí od 100 °C až do 800 °C a tyto výsledky byly porovnány s hodnotami, které byly získány ze vzorků vyrobených z portlandského cementu. Výsledkem experimentu bylo zjištění, že geopolymerní směsi mají srovnatelné mechanické vlastnosti jako směsi vyrobené z portlandského cementu, viz obrázek 19 [17, 18, 19, 20, 21, 22].



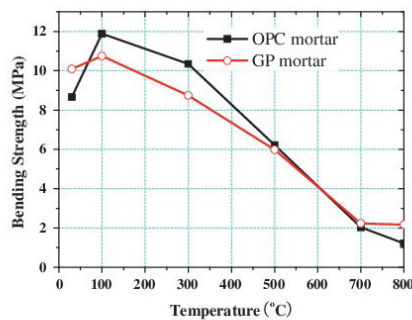
(a) Geopolymer and OPC paste



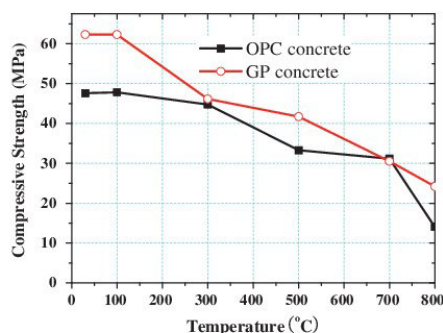
(a) Geopolymer and OPC paste



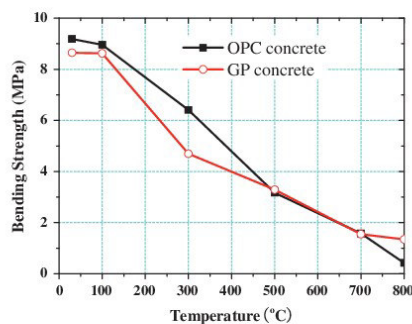
(b) Geopolymer and OPC mortar



(b) Geopolymer and OPC mortar



(c) Geopolymer and OPC concrete



(c) Geopolymer and OPC concrete

Fig. 8. Comparison of compressive strength in geopolymer and OPC specimens.

Fig. 7. Comparison of bending strength in geopolymer and OPC specimens.

Obr. 19: Porovnání mechanických vlastností zkoumaných směsí [22]

3.4.4 Bentonit

Bentonit je reziduální jílovitá hornina s velmi dobrou sorpční vlastností. Jedná se o horninu vznikající zvětráváním mateční horniny – čediče. Je charakterizována vysokým obsahem jílových minerálů. Typickou vlastností je, že při kontaktu s vodou intenzivně nabobtná. Podle schopnosti nasákavosti lze bentonit rozdělit na silně nasákavé a méně nasákavé.

Použití bentonitu je mnohostranné a řídí se jeho minerologickým složením a technologickými vlastnostmi. Nejvíce se ho spotřebuje jako pojivo ve slévárenském odvětví. Ve stavebnictví se bentonit používá jako těsnicí hmota, např. na skládkách, v tunelech, u přehrad jako tekuté

pažení, hydroizolace nebo jako přísada do betonu. Dále se používá např. v potravinářství, jako protipožární ochrana nebo ve zdravotnictví.



Obr. 20: Bentonit [26]

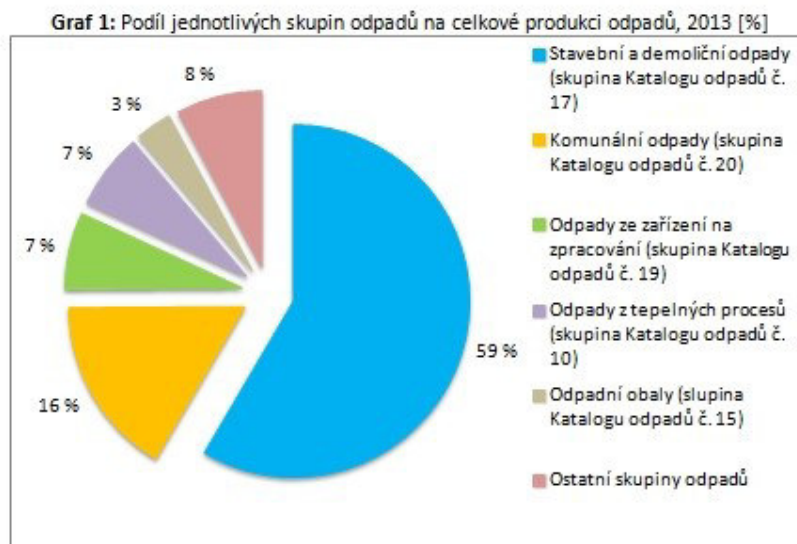
V praxi byl proveden výzkum, který se zabýval studií alkalické aktivace popílku s bentonitem. Na testovaných vzorcích byla provedena infračervená spektroskopie, rentgenová a SEM-EDX analýza. Tato studie došla ke zjištění, že bentonit působí jako plnivo a tvoří geopolymery kompaktnější, ale nevykazuje žádné zlepšení kompozitu [23, 24, 25, 26, 27].



Obr. 21: Geopolymer obsahující bentonit [27]

3.4.5 Cihelný odpad

Cihelný odpad představuje velké procento stavebních a demoličních odpadů, viz obrázek 22. Proto má recyklace strategický význam. Je tedy možno použít cihelný odpad k výrobě alternativních stavebních materiálů ve stavebním odvětví.



Obr. 22: Produkce odpadů v České Republice [29]

V cihelné výrobě vznikají odpady jako např. zmetky a nepodařené výrobky z různého stupně výroby. Návrat těchto odpadů zpět do technologie může způsobit ztrátu kvality výrobku a jeho užitných vlastností, tím snižuje jeho prodejnost jako plnohodnotného výrobku.



Obr. 23: Cihelný recyklát [30]

Na univerzitě v Bologni proběhl výzkum, který se zabýval studií alkalické aktivace cihelného odpadu a jeho možného použití ve formě malt pro udržitelnou výstavbu. Pro výzkum byly použity komerčně vyráběné cihly, které kvůli fyzikálním a geometrickým defektům nemohly být použity na trhu a byly použity jako zdroj cihelného prachu [28, 29, 30, 31].

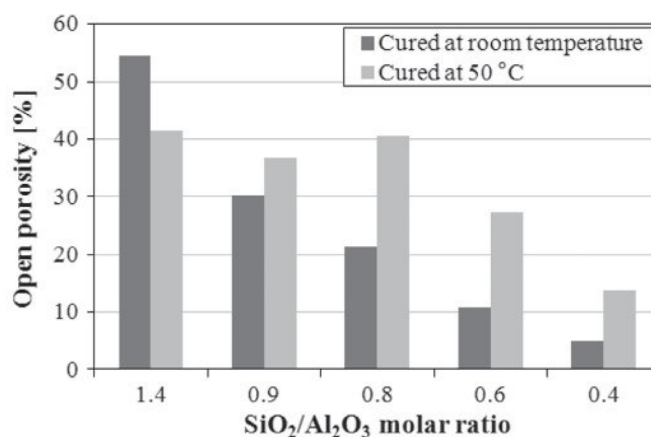
Table 1

Chemical composition and content of amorphous phases of the BWP.

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	TiO ₂
Overall amount (wt%)	58.00	10.64	0.60	1.85	12.36	3.88	4.82	0.55
Amorphous amount (wt%)	3.04	4.71	–	–	2.72	0.66	1.69	0.55

Obr. 24: Chemické složení cihelného prachu [31]

Hlavní amorfní fáze v cihelném prachu tvoří Al₂O₃ (4,71 % hmotn.) a SiO₂ (3,04 % hmotn.). Hlavní krystalickou fází tvoří křemen. Pro úpravu množství Al₂O₃ a SiO₂ byl použit hlinitan sodný a 44 % roztok křemičitanu sodného. Vytvrzování vzorků bylo zkoumáno při pokojové teplotě a při teplotě 50 °C. Touto studií byl zjištěn pokles otevřené pórovitosti při snižování obsahu SiO₂/Al₂O₃. U SiO₂/Al₂O₃ 1,4 byl molární poměr vhodný pro dosažení dobré úrovně geopolymery, ale nedostatečně reaktivní frakce byly k dispozici pro vytvoření kontinuální geopolymerní matice obsahující nezreagované frakce. Přidáváním hlinitanu sodného vedlo k progresivnímu zhuštění mikrostruktury (poklesl poměr SiO₂/Al₂O₃ na 0,4) [28, 29, 30, 31].

**Fig. 3.** Open porosity of samples as a function of SiO₂/Al₂O₃ ratio.*Obr. 25: Otevřená pórovitost jako funkce poměru SiO₂ / Al₂O₃ [31]*

Dále došlo ke zjištění, že tvorba výkvětů klesá postupným přidáváním hlinitanu sodného, což vede ke snížení poměru SiO₂/Al₂O₃. Přidáváním hlinitanu sodného se zvýší množství

reaktivní části Al_2O_3 . Vytvrzování při vysokých teplotách také podporuje snížení množství výkvětů u past. Využití materiálů vyrobených z cihelného prachu má velký potenciál, je však zapotřebí se dále zabývat optimalizací složení směsi, aby se zamezilo vzniku výkvětů [28, 29, 30, 31].

3.5 Vlastnosti geopolimerů

Jednotlivé vlastnosti geopolimerů závisí na charakteru výchozích surovin. Záleží např. na poměru $\text{SiO}_2 : \text{Al}_2\text{O}_3 : \text{CaO}$ (MgO) v surovině, složení kameniva nebo na druhu aktivátoru. Také záleží na způsobu přípravy, např. na teplotě prostředí nebo na způsobu zpracování směsi. Poměr $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ má vliv na pórovitost materiálu a tvorbu výkvětů. Vlastnosti geopolimerů může také ovlivnit přidání různých plniv nebo přidání výztuže do směsi ve formě přírodních vláken např. bavlna, sisal, rafie a kokos. Přidání vláken vede ke snížení vzniku trhlin ve struktuře. Kompozity s přidáním bavlny, sisalu nebo kokosových vláken vykazovaly relativně dobré mechanické vlastnosti [5, 7, 32].

4 Experimentální metody měření

4.1 Základní fyzikální vlastnosti

Pro zkoumání základních fyzikálních vlastností byla použita gravimetrická a pyknometrická metoda.

4.1.1 Gravimetrická metoda

Pro stanovení základních fyzikálních vlastností byla použita gravimetrická metoda. Touto metodou se stanovila objemová hmotnost, hustota pevné matrice a otevřená pórovitost jednotlivých vzorků. Při této metodě byly vzorky po 28 dnech od výroby umístěny do sušárny, kde byly ponechány při konstantní teplotě $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ až do doby, dokud se neustálila jejich hmotnost (ustálení hmotnosti nastává tehdy, jsou-li dvě po sobě provedená vážení po 2 hodinách od sebe rozdílná o méně než 0,2 %). Vysušené vzorky se oměřily, zvážily a byly ponořeny do vody po dobu 1 týdne a po té se znovu zvážily. V dalším kroku se vzorky zvážily pod vodou. Ze změřených rozměrů a hmotností vzorků se vypočítala objemová hmotnost, hustota pevné matrice a otevřená pórovitost [33].

Pro srovnání byl objem vzorků stanoven pomocí jednotlivých získaných hmotností, z kterých byly dopočteny dle následujícího vztahu následující parametry.

$$V = \frac{m_w - m_a}{\rho_w}$$

kde ρ_w je hustota vody [kg/m^3], m_w [kg] je hmotnost plně nasyceného vzorku a m_a [kg] je Archimedova hmotnost

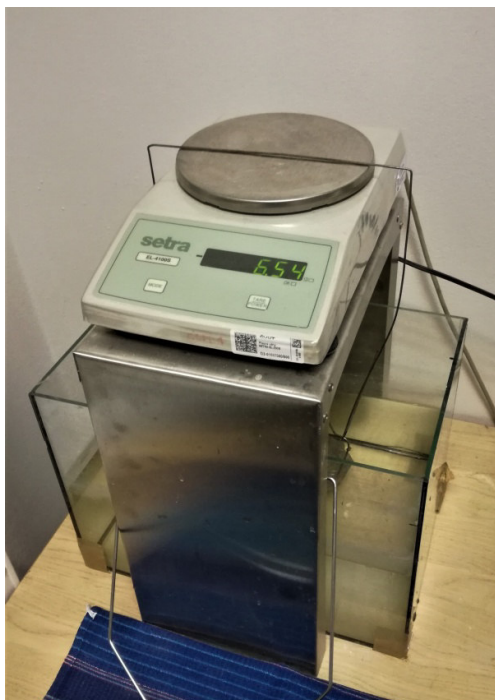
Dále se určí objemová hmotnost ρ [kg/m^3], hustota pevné matrice ρ_{mat} [kg/m^3] a otevřená pórovitost ψ_o [%] dle následujících vztahů:

$$\rho = \frac{m_d}{V}$$

$$\rho_{mat} = \frac{m_d}{V \cdot (1 - \psi_o)}$$

$$\psi_o = \frac{m_w - m_d}{V \cdot \rho_w}$$

kde m_d představuje hmotnost vysušeného vzorku [kg]



Obr. 26: Archimedovo vážení

4.1.2 Pyknometrická metoda

Hodnota pevné matrice byla dále stanovena pomocí héliového pyknometru. Při této metodě je využit malý rozměr atomu hélia, které je tak schopen vyplnit velmi malé póry.

Při měření se malý vzorek vložil do komory o známém objemu. Poté bylo hélium o daném tlaku vpuštěno nejprve do referenční komory a následně do měřicí komory, kde se měří jeho tlak. Ze vzájemného poměru tlaků a objemů se dopočetla hustota pevné matrice ρ_{mat} [kg/m³] [33, 34, 35].



Obr. 27: Héliový pyknometr [35]

4.2 Struktura materiálu (Porozimetrie)

Pro zkoumání pórového systému materiálu byla použita rtuťová porozimetrie. Tato metoda využívá jednoduchý princip, rtuť je kapalina s velmi vysokým povrchovým napětím, je to tedy nesmáčivá kapalina. To vede k omezenému průniku rtuti do porézní struktury, na rozdíl např. od vody. Pro průnik rtuti do porézního systému materiálu je potřeba použít vnější tlak. Čím je tlak vyšší, tím se rtuť dostane do menších pórů. Při použití nižšího tlaku (0,003 až 0,13 MPa) lze zachytit otevřené póry o poloměru 4 μm až 100 μm . Při vyšším tlaku lze detekovat póry o poloměru 3 nm. Povrchové napětí rtuti za laboratorních podmínek je 0,48 N/m a úhel smáčení při kontaktu se silikáty je 130. Při měření se do komory vložilo malé množství vysušeného vzorku. Komora se zaplnila rtutí a postupně docházelo ke zvyšování tlaku [33, 34, 36, 37].



Obr. 28: Rtuťový porozimetr [37]

4.3 Mechanické vlastnosti

K určení mechanických vlastností byly použity destruktivní metody. Ty jsou zpravidla přesnější a jsou založeny na vztahu mezi zatížením a deformací.

4.3.1 Pevnost v tlaku

Zkouška pevnosti v tlaku byla provedena dle normy ČSN EN 1015-11 [38]. Vzhledem k technologickým možnostem výroby vzorků bylo nutné použít jiné rozměry, než norma předepisuje. Při použití normových rozměrů docházelo u vzorků kvůli jemnosti materiálu k výskytu trhlin. Proto byla použita zkušební tělesa o rozměrech 20 x 20 x 100 mm ($b \times h \times l$). Pro provedení zkoušky byly použity zlomky zkušebních těles, které vznikly při zkoušce tahu za ohybu. Tyto zlomky byly umístěny do přístroje mezi ocelové destičky o velikosti 40 x 40 mm. Vzorek musí být umístěn ve středu tlačené plochy, aby docházelo k centrickému zatěžování vzorku. Zatěžování vzorku probíhalo rovnoměrně, až dokud nenastala destrukce vzorku. V této chvíli přístroj zaznamenal maximální sílu, kterou byl vzorek zatížen. Pevnost v tlaku R_m [MPa] se dopočte dle následujícího vztahu:

$$R_m = \frac{F}{A}$$

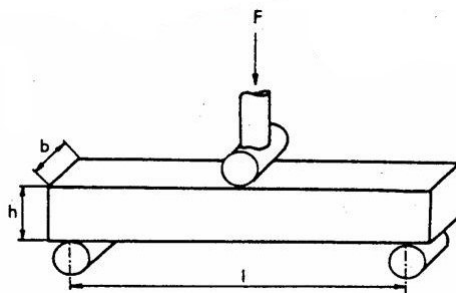
kde F [N] je maximální zatěžovací síla a A [mm²] zatěžovací plocha

4.3.2 Pevnost v tahu za ohybu

Zkouška pevnosti tahu za ohybu provedena dle normy ČSN EN 1015-11 [38]. Byla použita třibodová zkouška, viz. obr. 29. Zkušební těleso při testování bylo umístěno na dvě válcové podpory. Z důvodu použití zkušebních těles o rozměrech 20 x 20 x 100 mm bylo osová vzdálenost podpor přizpůsobena zkušebními tělesům oproti normové hodnotě nevzdálenost 80 mm. Těleso bylo zatěžováno rovnoměrnou silou až do chvíle, dokud nenastalo zlomení vzorku. Při porušení vzorku byla zaznamenána měřicím přístrojem maximální zatěžovací síla. Pevnost v tahu za ohybu R_f [MPa] se následně určila dle následujícího vztahu:

$$R_f = \frac{3}{2} \cdot \frac{F \cdot l}{b \cdot h^2}$$

kde F [N] je maximální zatěžovací síla, l [mm] je osová vzdálenost podpor
 b , h jsou rozměry zkušebního vzorku [mm]



Obr. 29: Třibodová zkouška [39]

5 Experimentální část

Experimentální část diplomové práce je zaměřena na studium základních fyzikálních vlastností a mechanických vlastností alkalicky aktivovaného cihelného prachu. Pro alkalickou aktivaci cihelného prachu bylo použito vodní sklo a hydroxid sodný v p.a. kvalitě. Vybrané směsi byly po dobu 1 týdne vystaveny zvýšené teplotě v rozmezí 20 °C až 80 °C. U směsí byla konkrétně zkoumána objemová hmotnost, hustota pevné matrice, otevřená pórovitost, tlaková pevnost a pevnost v tahu za ohybu. Výsledky jednotlivých měření byly mezi sebou

porovnány. Receptury vybraných směsí vznikly ve spolupráci s prof. Pavlou Rovnaníkovou z VUT v Brně.

5.1 Použité směsi

V rámci studie bylo použito celkem 7 směsí. Směsi byly rozděleny do dvou skupin podle hodnoty silikátového modulu na směsi typu A a směsi typu B.

5.1.1 Směsi typu A (rozdílné Ms)

První skupina obsahovala 4 směsi se stejným množstvím cihelného prachu, záměsové vody a vodního skla. Rozdílným parametrem bylo množství použitého hydroxidu sodného, jehož množství se u jednotlivých směsí postupně snižovalo. Směsi měly odlišný silikátový modul Ms v rozmezí od 0,8 do 1,2. Tyto směsi nesly označení 120, 121, 122 a 123, jejich složení je uvedeno v tabulce 1.

Tab. 1: Složení směsí typu A

Směs	Cihelný prach	Vodní sklo 1,6	NaOH	Voda	Ms
	[g]	[g]	[g]	[ml]	[-]
120	200	70	15,57	50	0,80
121	200	70	9,50	50	1,00
122	200	70	5,50	50	1,20
123	200	70	2,57	50	1,40

5.1.2 Směsi typu B (stejně Ms)

Druhá skupina obsahovala 3 směsi s označením 102, 105 a 108. Směsi obsahovaly pouze stejné množství cihelného prachu. Množství záměsové vody, vodního skla a hydroxidu sodného bylo rozdílné. Dané směsi měly stejný silikátový modul s hodnotou Ms 1,4. Složení je uvedeno v tabulce 2.

Tab. 2: Složení směsí typu B

Směs	Cihelný prach	Vodní sklo 1,6	NaOH	Voda	Ms
	[g]	[g]	[g]	[ml]	[-]
102	200	70	2,57	41	1,4
105	200	80	2,95	36	1,4
108	200	90	3,33	31	1,4

5.2 Charakteristika použitých surovin

5.2.1 Cihelný prach

V rámci experimentu byl použit cihelný prach, který vzniká jako odpadní produkt při výrobě cihelných tvárnic od společnosti Heluz cihlářský průmysl v.o.s. Prach vzniká při broušení cihelných tvárnic. Byly použity dva typy cihelných prachů ze dvou provozoven, první je v Hevlíně a druhá v Libochovicích. Oba prachy byly testovány podle modifikovaného Chappelle testu pro zjištění pucolánové aktivity. Pro cihelný prach z Hevlína vyšla hodnota 840 mg $\text{Ca}(\text{OH})_2/\text{g}$, pro prach z Libochovic vyšla hodnota 1190 mg $\text{Ca}(\text{OH})_2/\text{g}$. Hranice pucolánové aktivity se uvádí dle normy ČSN EN 196-5 [40] 650 mg $\text{Ca}(\text{OH})_2/\text{g}$. Oba prachy lze tedy hodnotit jako pucolánově aktivní. U prachů bylo dále zkoumáno jejich minerologické a chemické složení pomocí XRD a XRF analýzy, viz tabulka 3 až tabulka 6.

Tab. 3: Mineralogické složení cihelného prachu - Hevlín

Amorfní fáze		27,8
Křemen	SiO_2	26,2
Hematit	Fe_2O_3	2,3
Albit	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$	13,0
Microklin	KAlSi_3O_8	3,6
Ortoklas	KAlSi_3O_8	3,5
Muscovit	$\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$	12,5
Illit	$\text{K}_{0.65}\text{Al}_2(\text{Al}_{0.65}\text{Si}_{3.35}\text{O}_{10})(\text{OH})_2$	3,8
Diopsid	$\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$	4,4
Akermanit	$\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$	2,8
Mullit	$\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$	-
Anhydrit	CaSO_4	-

Tab. 4: Mineralogické složení cihelného prachu - Libochovice

Amorfní fáze		47
Křemen	SiO_2	20,0
Hematit	Fe_2O_3	2,0
Albit	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$	3,5
Microklin	KAlSi_3O_8	4,2
Ortoklas	KAlSi_3O_8	6,5
Muscovit	$\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$	4,4
Illit	$\text{K}_{0,65}\text{Al}_2(\text{Al}_{0,65}\text{Si}_{3,35}\text{O}_{10})(\text{OH})_2$	3,1
Diopsid	$\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$	1,6
Akermanit	$\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$	2,9
Mullit	$\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$	2,9
Anhydrit	CaSO_4	2,0

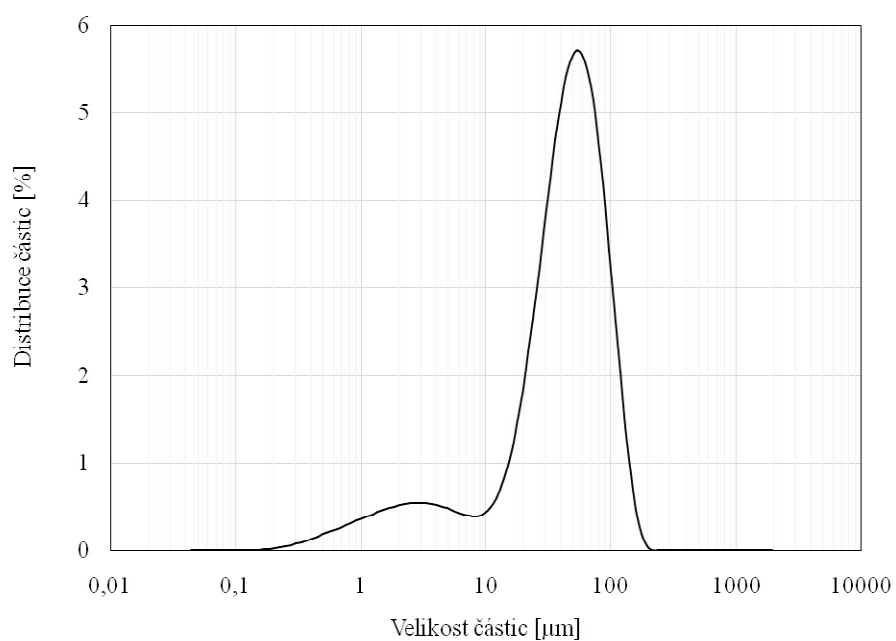
Tab. 5: Chemické složení cihelného prachu - Hevlín

		Výpočet složení amorfní fáze
SiO_2	58,8	27,6
Al_2O_3	19,6	34,5
Fe_2O_3	5,7	12,2
CaO	6,9	16,6
MgO	2,8	5,6
K_2O	2,9	0,0
Na_2O	1,5	0,0
TiO_2	0,8	2,9
SO_3	0,7	2,5

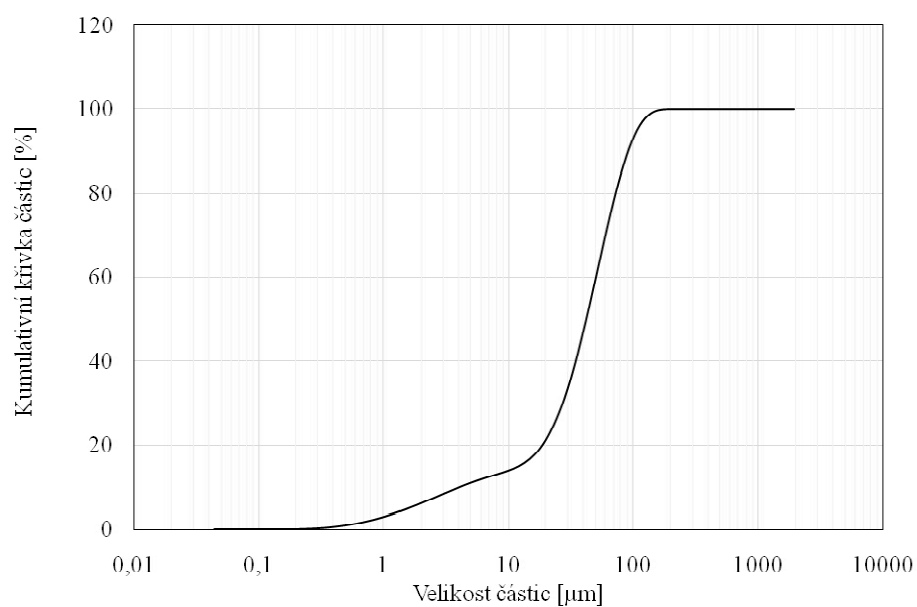
Tab. 6: Chemické složení cihenného prachu - Libochovice

		Výpočet složení amorfní fáze
SiO₂	49,9	29,6
Al₂O₃	20,4	27,3
Fe₂O₃	5,0	6,4
CaO	15,4	27,6
MgO	2,8	4,4
K₂O	3,3	1,5
Na₂O	0,5	0,2
TiO₂	0,8	1,7
SO₃	1,5	0,7

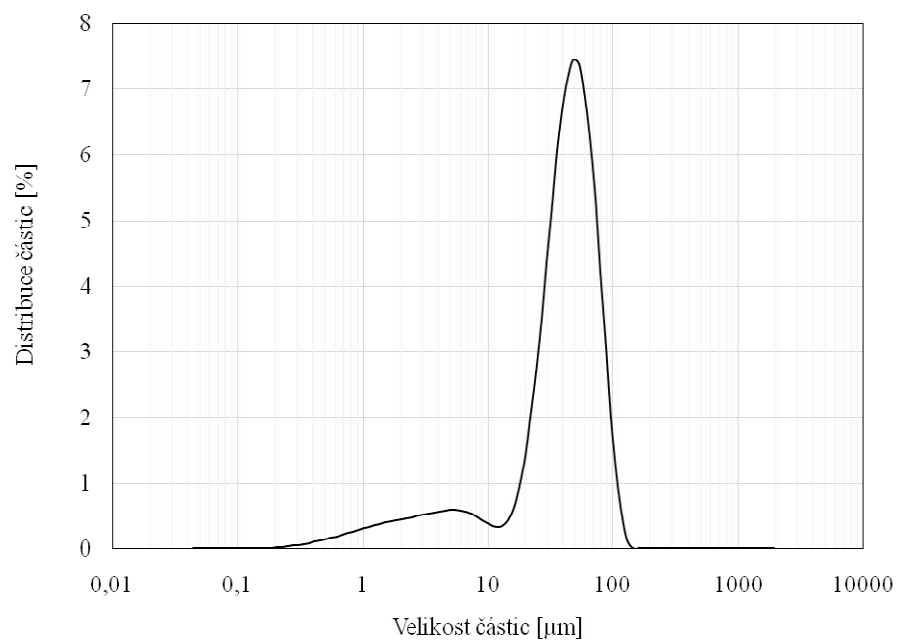
Na obrázcích 30 až 33 jsou znázorněny granulometrie jednotlivých cihelných prachů.



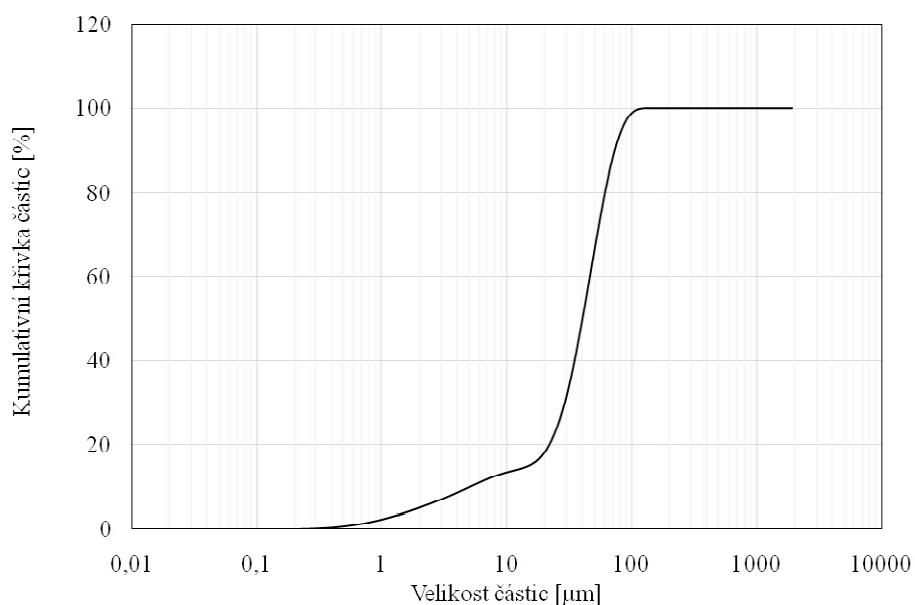
Obr. 30: Granulometrie – distribuce částic – Hevlínský prach



Obr. 31: Granulometrie – kumulativní křivka částic – Hevlínský prach



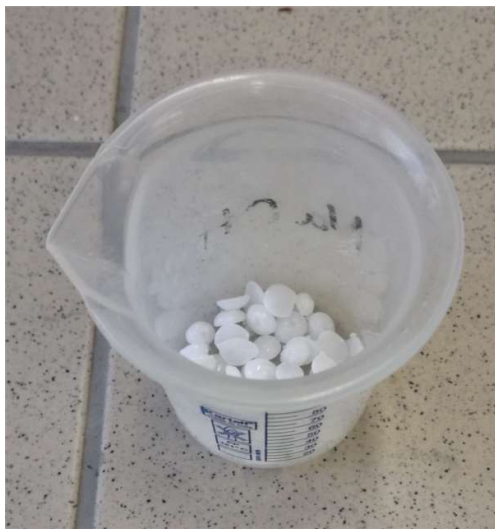
Obr. 32: Granulometrie – distribuce částic – Libochovický prach



Obr. 33: Granulometrie – kumulativní křivka částic – Libochovický prách

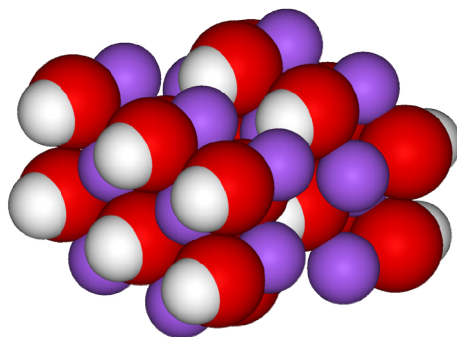
5.2.2 Hydroxid sodný

Hydroxid sodný (NaOH) je silně zásaditá anorganická hornina. V čistém stavu se nachází ve formě bílých pecek. Při rozpouštění ve vodě se štěpí na ionty Na^+ a OH^- . Hydroxidové anionty způsobují alkalickou reakci.



Obr. 34: Hydroxid sodný ve formě pecek v p.a. kvalitě

Hydroxid sodný je dobře rozpustný v etanolu, metanolu a ve vodě. Vodný roztok hydroxidu sodného je bezbarvá čirá viskózní kapalina. Při rozpouštění se uvolňuje velké množství tepla. Na vzduchu reaguje s oxidem uhličitým za vzniku uhličitanu sodného, z toho důvodu musí být uchováván v hermeticky uzavřeném obalu.

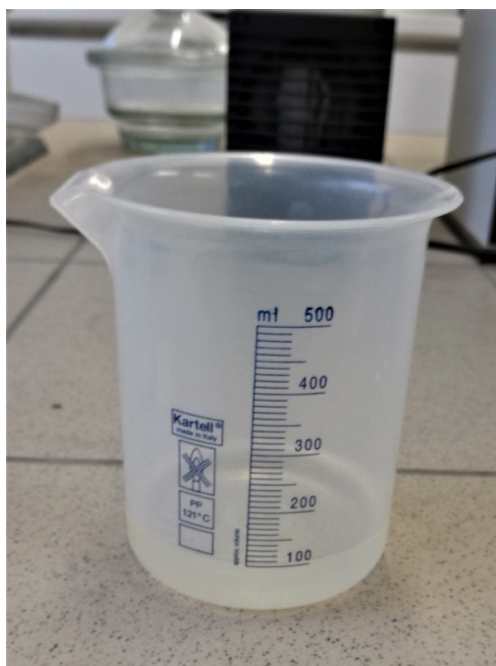


Obr. 35: Krystalová mřížka hydroxidu sodného [41]

Hydroxid sodný má velice široké využití např. v chemickém průmyslu (např. při výrobě mýdel a povrchově aktivních látek), v textilním průmyslu, při výrobě celulózy, v papírenském průmyslu, v hutnictví, ve vodárenství při úpravě pitné vody, v potravinářství (např. jako desinfekční činidlo pro vymývání trojů). V domácnostech se dá využít např. při čištění odpadních potrubí nebo při praní. Jedná se o velmi silnou žiravinu, která způsobuje při kontaktu s pokožkou hluboké poleptání, které se dlouho a obtížně hojí, je tedy potřeba při manipulaci s roztokem používat ochranné pomůcky [41, 42].

5.2.3 Vodní sklo

Vodní sklo je vodný roztok křemičitanu sodného. Složení vodního skla je nejčastěji charakterizováno křemičitým modulem M_s , což je molární poměr $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ pro sodné sklo nebo $\text{SiO}_2/\text{K}_2\text{O}$ pro draselné sklo. Hodnota silikátového modulu se obvykle pohybuje v rozmezí 1,6 – 4,1. V našem případě bylo použito sodné vodní sklo se silikátovým modulem $M_{1,6}$.



Obr. 36: Vodní sklo

Vodní sklo se vyrábí tavením sklářského písku, v dnešní době nejčastěji buď ve sklářské vanové peci při teplotě 1400 – 1600 °C, nebo v autoklávu. V běžných případech se vodní sklo používá např. ve stavebnictví k urychlení tuhnutí cementových směsí, k mineralizaci dřevěných konstrukcí (dřevo je tím chráněno proti účinkům požáru) nebo jako aktivátor při výrobě geopolymerních materiálů. Dále se používá např. jako přísada do odmašťovacích, pracích a čisticích prostředků nebo jako lepidlo v papírenském průmyslu.

Vzhledem k obsahu NaOH vodní sklo při kontaktu s pokožkou způsobuje těžké poleptání kůže, je tedy potřeba při práci s ním používat ochranné pomůcky [43, 44, 45].

5.2.4 Voda

Voda pro výrobu geopolymérů by měla splňovat stejné podmínky jako záměsová voda do betonů dle ČSN EN 1008 [46]. Jako zdroj vody může být použita např. pitná voda, voda získaná při recyklaci, podzemní či povrchová voda. Zmíněné vody s výjimkou pitné vody musí být testovány dle příslušné normy a musí splňovat jednotlivá kritéria. Pro naše účely byla použita jako záměsová voda pitná voda, která testována být nemusí [47].

5.3 Pracovní postup

Před započítím výroby vlastních vybraných směsí bylo nutné oba cihelné prachy nechat vysušit v sušárně, aby z nich byla odstraněna vlhkost. Oba prachy byly po vysušení prosety na velikost frakce $< 1 \mu\text{m}$.

Na počátku odlévání vybraných směsí bylo nejprve naváženo potřebné množství jednotlivých surovin dle konkrétní receptury. Poté byl smíchán hydroxid sodný s vodou, ve které byly za stálého míchání rozpuštěny NaOH pecky. Při rozpouštění velkého množství hydroxidu sodného kapalina vykazovala zvýšenou teplotu, proto se kapalina nechala odstát a vychladnout. Po vychladnutí byl rozpuštěný hydroxid sodný ve vodě smíchán vodním sklem. Tato tekutina byla nalita do míchací nádoby a postupně za stálého míchání byl do ní vsypáván cihelný prach. Vzniklá směs poté byla odlita do předem připravených forem, které byly ošetřeny přípravkem pro lepší odbedňování. Následně byly formy důkladně zakryty fólií a byly vloženy do klimatické komory, ve které se ponechaly jeden den při teplotě $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Poté byla teplota zvýšena na konkrétní hodnotu dle výzkumu. Vzorby byly ponechány v klimatické komoře po dobu 6 dní. Poté byly vyjmuty, došlo k jejich odformování a byly ponechány v laboratorních podmínkách při teplotě $20\text{ }^{\circ}\text{C}(\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C})$ až do 28. dne.

6 Experimentální výsledky

Vzhledem k technologickým možnostem výroby materiálů bylo nutné použít vzorky o rozměrech $20 \times 20 \times 100\text{ mm}$. Z důvodu jemnosti materiálu docházelo u vzorků s normovými rozměry ($40 \times 40 \times 160\text{ mm}$) ke vzniku trhlin a k popraskání vzorku už při zrání. V důsledku těchto trhlin nebylo možné materiály těchto rozměrů pro zvolené experimenty použít. Z těchto důvodů musely být použity nestandardní vzorky, které se liší od vzorků požadovaných normou.

Z experimentálních výsledků byly mezi sebou porovnávány hodnoty objemové hmotnosti, hustoty pevné matrice, otevřené pórovitosti, pevnosti v tlaku a pevnosti v tahu za ohybu. Dále byla mezi sebou porovnávána pórová struktura jednotlivých typů materiálů.

V rámci jednotlivých skupin, tzn. směsí typu A a směsí typu B, byly mezi sebou porovnávány nejprve hodnoty referenčních materiálů (tzn. materiálů, které měly teplotu ošetření $20\text{ }^{\circ}\text{C}$). U směsí typu A se jednalo o materiály H(L)-120-P a H(L)-123-P, u směsí typu B se jednalo o materiály H(L)-102-P a H(L)-108-P. Dále byl pozorován vliv zvýšené teploty ošetření ($40,60$ a $80\text{ }^{\circ}\text{C}$) na jednotlivé vlastnosti studovaných materiálů. Porovnávání

byly mezi sebou hodnoty vlivu zvýšené teploty ošetření (80 °C) vzhledem k referenční teplotě u jednotlivých skupin materiálů.

6.1 Základní fyzikální vlastnosti

6.1.1 Směsi typu A

V tabulce 7 až 10 jsou uvedeny základní fyzikální vlastnosti, konkrétně objemová hmotnost, hustota pevné matrice a otevřená pórovitost směsí typu A s rozdílnou hodnotou M_s . Studované parametry byly stanoveny pomocí gravimetrické a pyknometrické metody. Výsledky z gravimetrické metody byly méně přesné, a proto byly brány pouze jako orientační. Z tohoto důvodu nejsou v této práci uvedeny a jsou zde prezentovány pouze výsledky z metody pyknometrické.

Tab. 7: Základní fyzikální vlastnosti - referenční teplota - Hevlín

Pyknometr - po 28 dnech			
Prosátý prach - bez teploty, Hevlín	ρ [kg/m ³]	ρ_{mat} [kg/m ³]	Ψ_0 [%]
H-120-P	1948	2599	25,03
H-121-P	1886	2631	28,33
H-122-P	1812	2641	31,38
H-123-P	1760	2672	34,14

Tab. 8: Základní fyzikální vlastnosti – teplota ošetření 40 °C - Hevlín

Pyknometr - po 28 dnech			
Prosátý prach - teplota 40 °C, Hevlín	ρ [kg/m ³]	ρ_{mat} [kg/m ³]	Ψ_0 [%]
H4-120-P	1831	2564	28,56
H4-121-P	1740	2593	32,91
H4-122-P	1690	2585	34,63
H4-123-P	1663	2616	36,43

Tab. 9: Základní fyzikální vlastnosti - teplota ošetření 60 °C - Hevlín

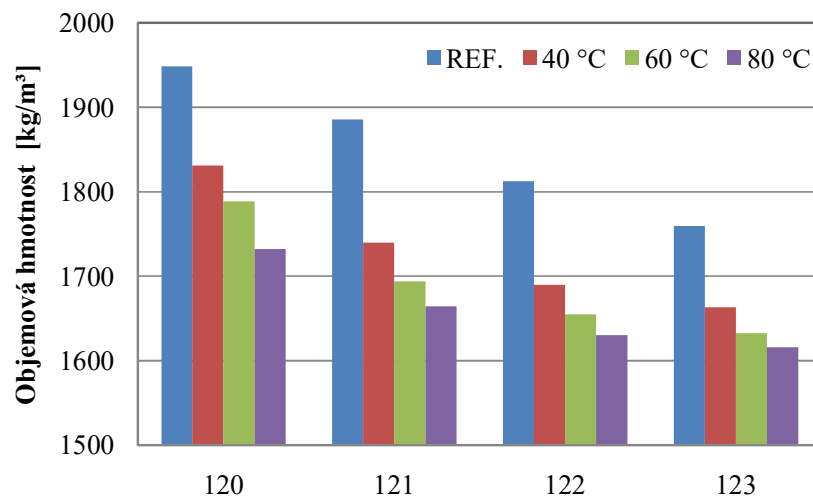
Pyknometr - po 28 dnech			
Prosátý prach - teplota 60 °C, Hevlín	ρ [kg/m ³]	ρ_{mat} [kg/m ³]	Ψ_0 [%]
H6-120-P	1788	2555	30,01
H6-121-P	1694	2562	33,88
H6-122-P	1655	2563	35,44
H6-123-P	1633	2584	36,83

Tab. 10: Základní fyzikální vlastnosti - teplota ošetření 80 °C - Hevlín

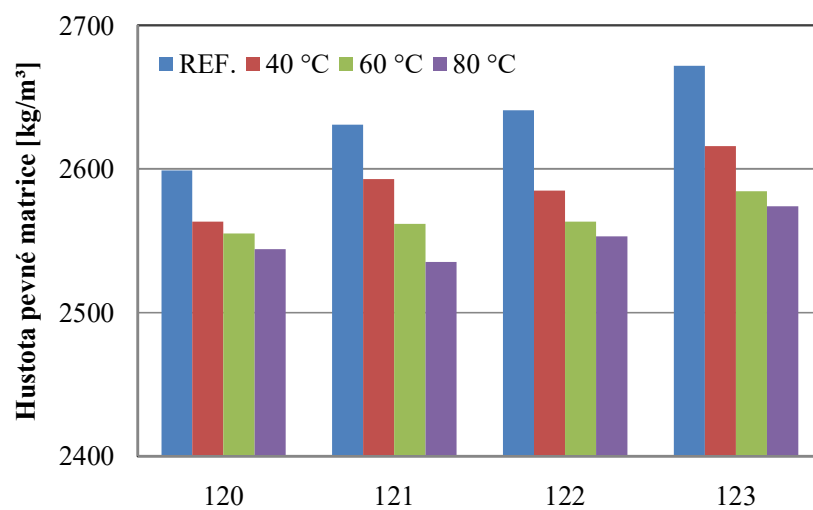
Pyknometr - po 28 dnech			
Prosátý prach - teplota 80 °C, Hevlín	ρ [kg/m ³]	ρ_{mat} [kg/m ³]	Ψ_0 [%]
H8-120-P	1732	2544	31,92
H8-121-P	1664	2535	34,34
H8-122-P	1630	2553	36,15
H8-123-P	1616	2574	37,23

Na obrázcích 37 až 39 jsou zobrazeny grafy shrnující výsledky základních fyzikálních vlastností při teplotě ošetření od 20 do 80 °C. U hodnot objemové hmotnosti a hustoty pevné matrice lze pozorovat klesající charakter s rostoucí hodnotou M_s . Rozdíl u hodnot objemové hmotnosti mezi materiály H-120-P a H-123-P byl kolem 13 %. U objemové hmotnosti lze dále z grafu pozorovat, že vzhledem k teplotě ošetření (20 °C x 80 °C) nastal u všech skupin směsí se zvyšující se teplotou ošetření podobný pokles hodnot (kolem 10 %).

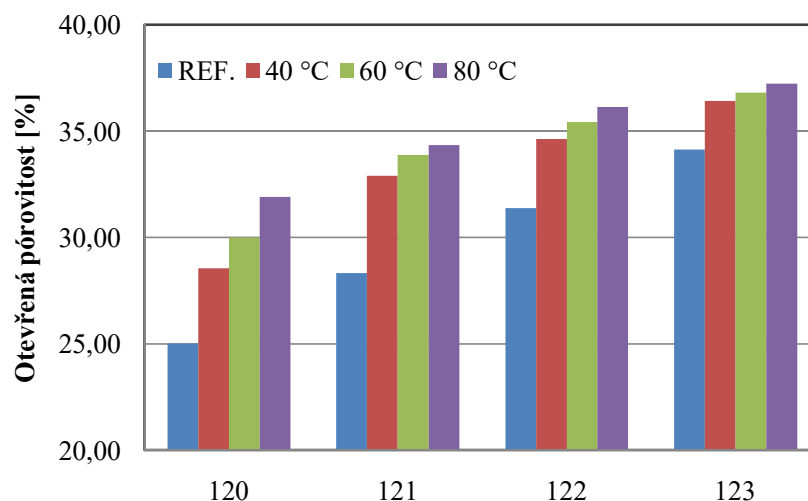
U hodnot otevřené pórovitosti nastal rostoucí trend se zvyšujícím se silikátovým modulem. Mezi materiály H-120-P a H-123-P byl rozdíl hodnot kolem 37 %. U hodnot lze dále pozorovat rostoucí trend s rostoucí teplotou při ošetření. Nejvyšší nárůst otevřené pórovitosti po ošetření 80 °C byl zaznamenán u materiálu 120, který dosáhl vzhledem k referenční teplotě rozdílu přibližně 28 %. Nejmenší vliv teploty ošetření (80 °C) vzhledem k referenčnímu materiálu byl pozorován u materiálu 123 (okolo 9 %).



Obr. 37: Objemová hmotnost- směsi typu A - Hevlín (po 28 dnech)



Obr. 38: Hustota pevné matrice - směsi typu A - Hevlín (po 28 dnech)



Obr. 39: Otevřená pórovitost - směsi typu A - Hevlín (po 28 dnech)

V tabulce 11 až 14 jsou uvedeny výsledky pyknometrického měření na vzorcích směsí typu A vyrobených v cihelného prachu pocházejícího z Libochovic.

Tab. 11: Základní fyzikální vlastnosti - referenční teplota - Libochovice

Pyknometr - po 28 dnech			
Prosátý prach - bez teploty, Libochovice	ρ [kg/m ³]	ρ_{mat} [kg/m ³]	Ψ_0 [%]
L-120-P	1896	2417	21,55
L-121-P	1785	2423	26,33
L-122-P	1696	2445	30,63
L-123-P	1642	2472	38,04

Tab. 12: Základní fyzikální vlastnosti - teplota ošetření 40 °C - Libochovice

Pyknometr - po 28 dnech			
Prosátý prach - teplota 40 °C, Libochovice	ρ [kg/m ³]	ρ_{mat} [kg/m ³]	Ψ_0 [%]
L4-120-P	1882	2337	19,47
L4-121-P	1757	2345	25,07
L4-122-P	1695	2373	28,56
L4-123-P	1626	2386	32,27

Tab. 13: Základní fyzikální vlastnosti - teplota ošetření 60 °C - Libochovice

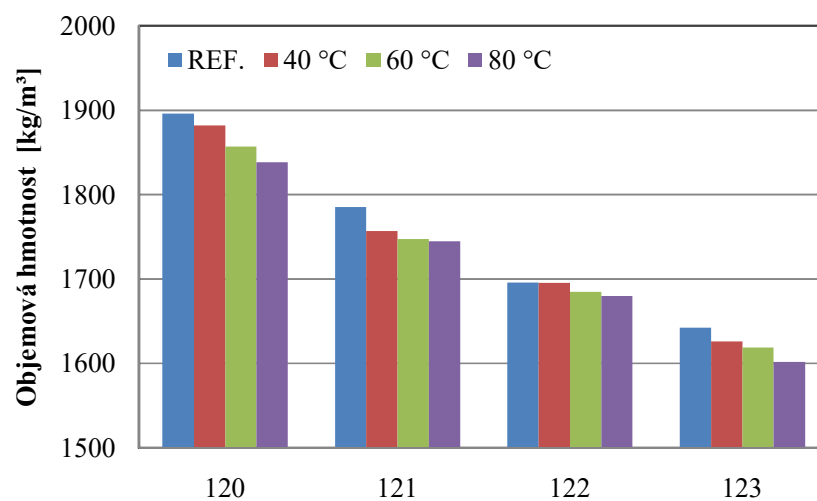
Pyknometr - po 28 dnech			
Prosátý prach - teplota 60 °C, Libochovice	ρ [kg/m ³]	ρ_{mat} [kg/m ³]	Ψ_0 [%]
L6-120-P	1857	2286	18,98
L6-121-P	1747	2294	23,83
L6-122-P	1685	2353	28,39
L6-123-P	1619	2364	29,40

Tab. 14: Základní fyzikální vlastnosti - teplota ošetření 80 °C - Libochovice

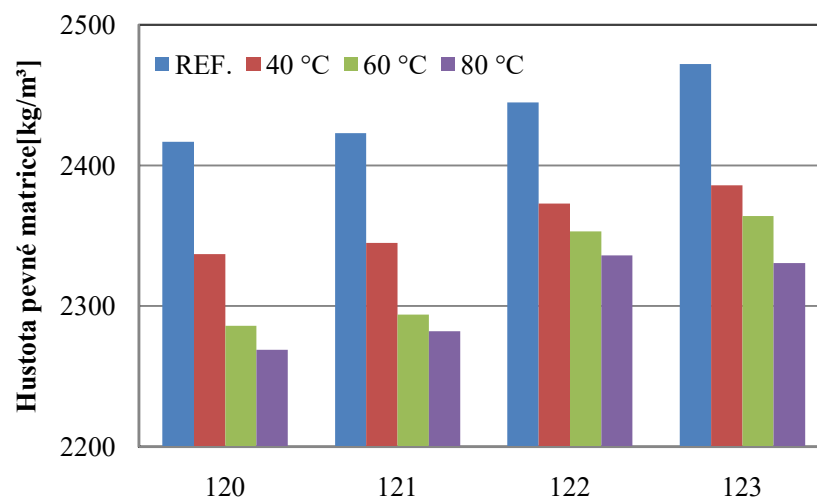
Pyknometr - po 28 dnech			
Prosátý prach - teplota 80 °C, Libochovice	ρ [kg/m ³]	ρ_{mat} [kg/m ³]	Ψ_0 [%]
L8-120-P	1838	2269	18,77
L8-121-P	1745	2282	23,53
L8-122-P	1680	2336	28,08
L8-123-P	1602	2331	28,26

Na obrázcích 40 až 42 jsou shrnuty naměřené výsledky základních fyzikálních vlastností při teplotě ošetření od 20 do 80 °C směsí typu A vyrobených z cihelného prachu z Libochovic. U hodnot objemové hmotnosti lze pozorovat klesající trend s rostoucí hodnotou silikátového modulu. Mezi materiály L-120-P a L-123-P nastal rozdíl hodnot kolem 13 %. Dále lze u hodnot objemové hmotnosti pozorovat, že s rostoucí teplotou ošetření mají klesající charakter. Nejvyšší pokles po teplotním ošetření (80 °C) vzhledem k laboratorním podmínkám nastal u materiálu 120 (okolo 3%).

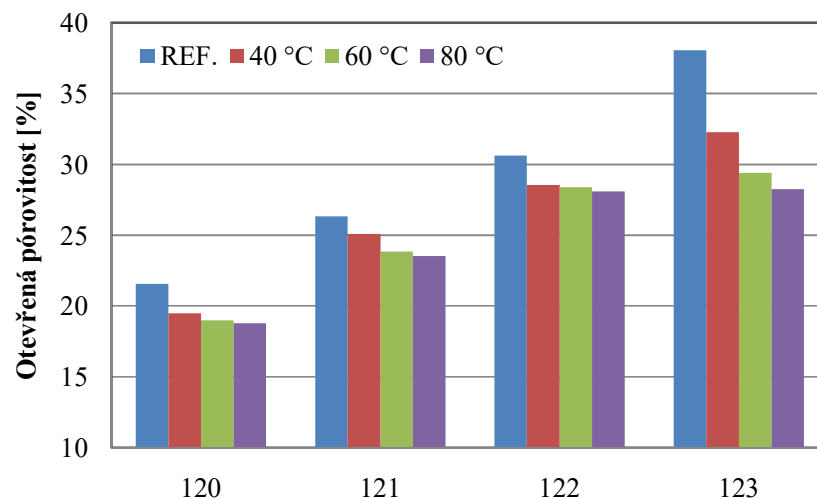
U hodnot hustoty pevné matrice a otevřené pórovitosti lze pozorovat rostoucí trend s rostoucím silikátovým modulem. Materiál s nejvyšší hodnotou Ms (L-123-P) vykazoval oproti materiálu s nejnižší hodnotou Ms (L-120-P) přibližně o 75 % vyšší hodnotu otevřené pórovitosti. Z grafu je dále patrné, že u hodnot otevřené pórovitosti nastal klesající trend s rostoucí teplotou ošetření. Největší vliv teploty ošetření vzhledem k referenčnímu stavu byl pozorován u materiálu 123 (okolo 26 %). U ostatních skupin materiálů (120, 121, 122) byl rozdíl hodnot otevřené pórovitosti referenčního materiálu a materiálu ošetřeného při 80 °C menší než u materiálu 123 (činil zhruba 10 %).



Obr. 40: Objemová hmotnost - směsi typu A - Libochovice (po 28 dnech)



Obr. 41: Hustota pevné matrice - směsi typu A - Libochovice (po 28 dnech)



Obr. 42: Otevřená pórovitost - směsi typu A - Libochovice (po 28 dnech)

6.1.2 Směsi typu B

V tabulkce 15 až 18 jsou uvedeny výsledky pyknometrického měření směsí typu B vyrobených z cihelného prachu, který pochází z Hevlína.

Tab. 15: Základní fyzikální vlastnosti - referenční teplota - Hevlín

Pyknometr - po 28 dnech			
Prosátý prach - bez teploty, Hevlín	ρ [kg/m ³]	ρ_{mat} [kg/m ³]	Ψ_0 [%]
H-102-P	1879	2636	28,71
H-105-P	1842	2643	30,30
H-108-P	1804	2632	31,45

Tab. 16: Základní fyzikální vlastnosti - teplota ošetření 40 °C - Hevlín

Pyknometr - po 28 dnech			
Prosátý prach - bez teploty, Hevlín	ρ [kg/m ³]	ρ_{mat} [kg/m ³]	Ψ_0 [%]
H4-102-P	1810	2589	30,10
H4-105-P	1740	2594	32,93
H4-108-P	1689	2588	34,75

Tab. 17: Základní fyzikální vlastnosti - teplota ošetření 60 °C - Hevlín

Pyknometr - po 28 dnech			
Prosátý prach - bez teploty, Hevlín	ρ [kg/m ³]	ρ_{mat} [kg/m ³]	Ψ_0 [%]
H6-102-P	1757	2583	31,96
H6-105-P	1708	2582	33,87
H6-108-P	1641	2555	35,80

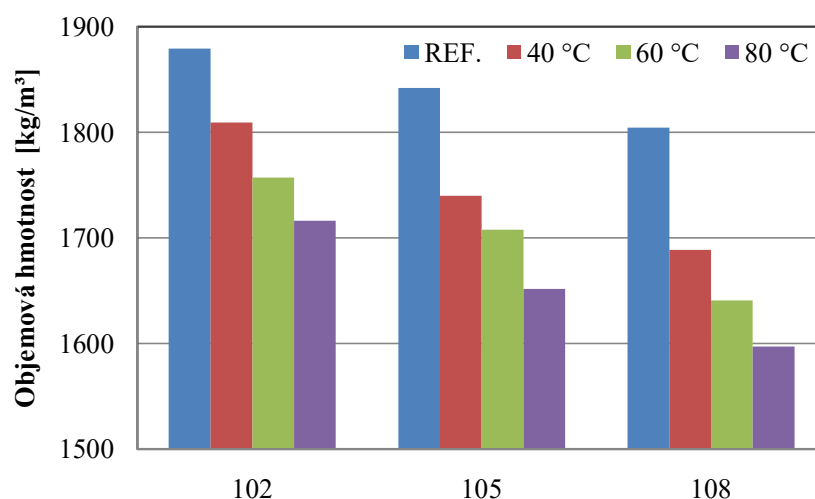
Tab. 18: Základní fyzikální vlastnosti - teplota ošetření 80 °C - Hevlín

Pyknometr - po 28 dnech			
Prosátý prach - bez teploty, Hevlín	ρ [kg/m ³]	ρ_{mat} [kg/m ³]	Ψ_0 [%]
H8-102-P	1716	2566	33,11
H8-105-P	1651	2540	34,98
H8-108-P	1597	2515	36,51

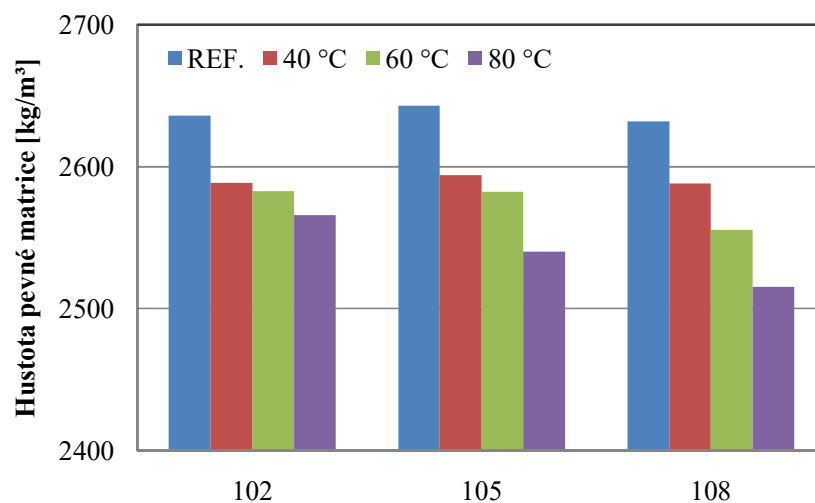
Na obrázcích 43 až 45 jsou uvedeny grafy shrnující základní fyzikální vlastnosti směsí typu B. U hodnot objemové hmotnosti a hustoty pevné matrice lze pozorovat klesající charakter se zvyšujícím se množstvím vodního skla a NaOH ve směsi. Vzhledem k referenčnímu materiálu H-102-P vykazoval materiál H-108-P o přibližně 4 % nižší hodnotu objemové hmotnosti. Dále je z grafu patrné, že hodnoty objemové hmotnosti a hustoty pevné matrice mají klesající trend se zvyšující se teplotou ošetření. U materiálů 102, 105 a 108 byl

pozorování objemové hmotnosti podobným pokles hodnot s rostoucí teplotou ošetření (80 °C) vzhledem k referenčnímu stavu (okolo 10 %).

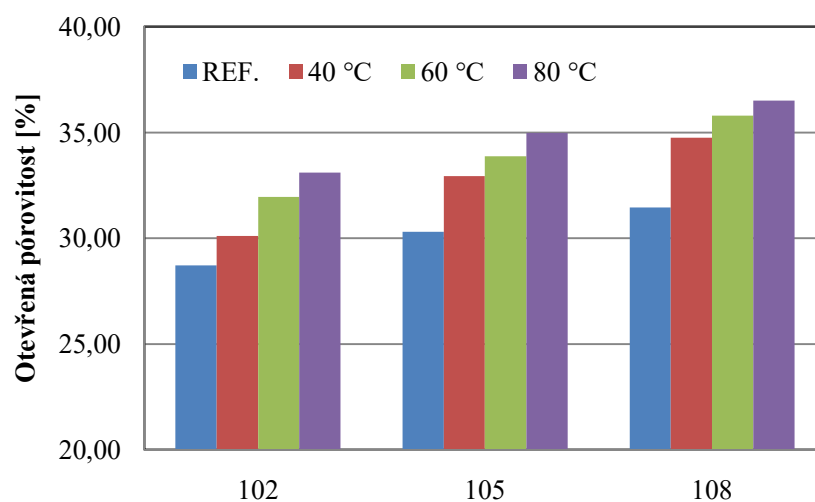
Z grafu otevřené pórovitosti je patrné, že u hodnot nastal rostoucí trend se zvyšujícím se množstvím vodního skla a NaOH v materiálu. Mezi referenčními materiály H-102-P a H-108-P byl pozorován pokles hodnot přibližně o 9 %. U skupin materiálů 102, 105 a 108 nastal u hodnot otevřené pórovitosti rostoucí trend se zvyšující se teplotou ošetření. Vliv teploty ošetření (80 °C) vzhledem k referenčnímu stavu byl srovnatelný u všech typů skupin materiálů (102, 105 a 108) podobný, hodnoty otevřené pórovitosti vzrostly vzhledem k referenční teplotě zhruba o 10 %.



Obr. 43: Objemová hmotnost - směsi typu B - Hevlín (po 28 dnech)



Obr. 44: Hustota pevné matrice - směsi typu B - Hevlín (po 28 dnech)



Obr. 45: Otevřená pórovitost - směsi typu B - Hevlín (po 28 dnech)

V tabulce 19 až 22 jsou uvedeny výsledky měření základních fyzikálních vlastností směsí typu B vyrobených z cihelného prachu pocházejícího z Libochovic.

Tab. 19: Základní fyzikální vlastnosti - referenční teplota - Libochovice

Pyknometr - po 28 dnech			
Prosátý prach - bez teploty, Libochovice	ρ [kg/m ³]	ρ_{mat} [kg/m ³]	Ψ_0 [%]
L-102-P	1663	2515	33,87
L-105-P	1705	2462	30,74
L-108-P	1740	2397	27,41

Tab. 20: Základní fyzikální vlastnosti - teplota ošetření 40 °C - Libochovice

Pyknometr - po 28 dnech			
Prosátý prach - teplota 40 °C, Libochovice	ρ [kg/m ³]	ρ_{mat} [kg/m ³]	Ψ_0 [%]
L4-102-P	1696	2381	28,80
L4-105-P	1734	2340	25,92
L4-108-P	1746	2297	24,01

Tab. 21: Základní fyzikální vlastnosti - teplota ošetření 60 °C - Libochovice

Pyknometr - po 28 dnech			
Prosátý prach - teplota 60 °C, Libochovice	ρ [kg/m ³]	ρ_{mat} [kg/m ³]	Ψ_0 [%]
L6-102-P	1704	2368	28,03
L6-105-P	1744	2300	24,18
L6-108-P	1752	2284	23,29

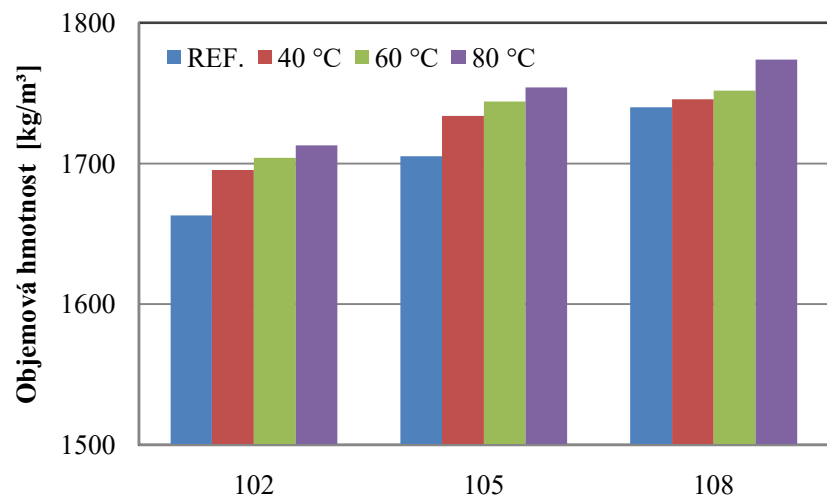
Tab. 22: Základní fyzikální vlastnosti - teplota ošetření 80 °C - Libochovice

Pyknometr - po 28 dnech			
Prosátý prach - teplota 80 °C, Libochovice	ρ [kg/m ³]	ρ_{mat} [kg/m ³]	Ψ_0 [%]
L8-102-P	1713	2350	27,10
L8-105-P	1754	2276	22,93
L8-108-P	1774	2251	21,21

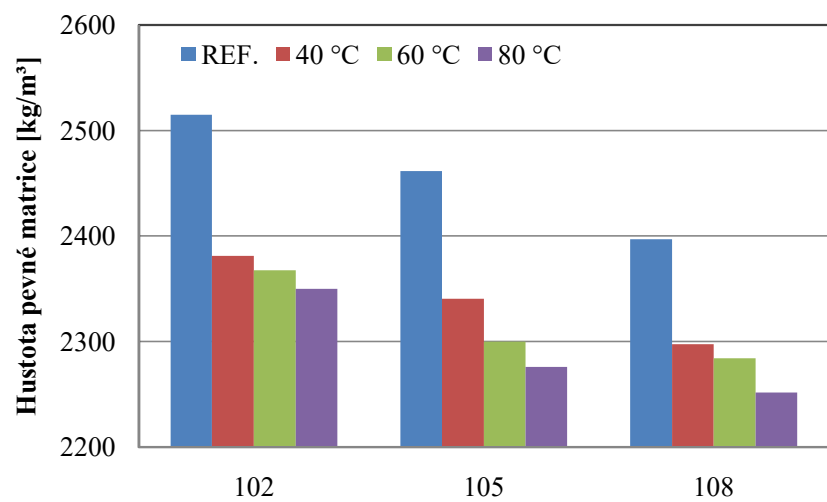
Na obrázcích 46 až 48 jsou shrnuty výsledky měření základních fyzikálních vlastností směsí typu B. U hodnot objemové hmotnosti lze pozorovat rostoucí trend se zvyšujícím se množstvím vodního skla a NaOH ve směsi. Mezi hodnotami objemové hmotnosti u materiálu L-102-P a materiálu L-108-P nastal rozdíl zhruba 5%.

Z grafu je dále patrné, že hodnoty objemové hmotnosti mají rostoucí charakter se zvyšující se teplotou ošetření. Rozdíl hodnot vzhledem k teplotě ošetření (20 °C x 80 °C) byl u všech skupin materiálů podobný (kolem 3%).

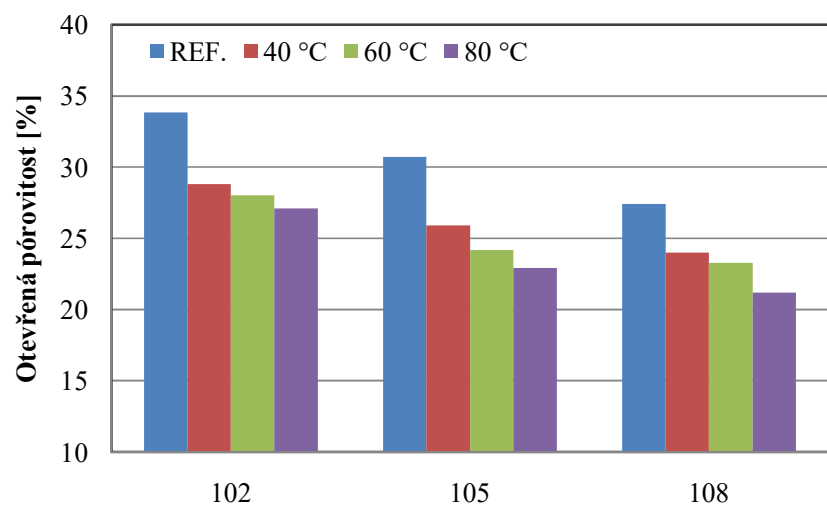
U hodnot hustoty pevné matrice a otevřené pórovitosti lze z grafu pozorovat, že hodnoty mají klesající trend se zvyšujícím se množstvím vodního skla a NaOH ve směsi. Vzhledem k referenčnímu materiálu L-102-P vykazoval materiál L-108-P zhruba o 20 % nižší hodnotu otevřené pórovitosti. Dále lze pozorovat, že hodnoty hustoty pevné matrice a otevřené pórovitosti mají klesající trend se zvyšující se teplotou ošetření. U hodnot otevřené pórovitosti nastal nejvyšší vliv teploty ošetření (80 °C) vzhledem k referenčnímu stavu u materiálu 105 (okolo 25 %). Nejmenší vliv teploty ošetření vzhledem k referenčnímu materiálu nastal u materiálu 102 (zhruba 20 %).



Obr. 46: Objemová hmotnost - směsi typu B - Libochovice (po 28 dnech)



Obr. 47: Hustota pevné matrice - směsi typu B - Libochovice (po 28 dnech)

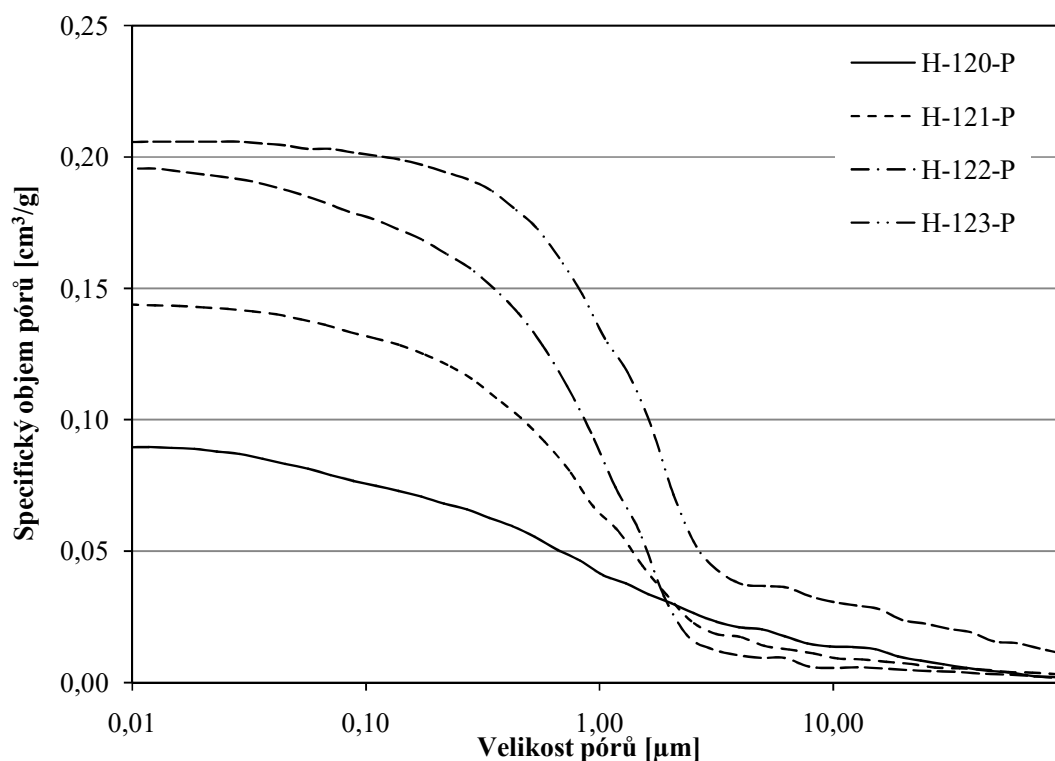


Obr. 48: Otevřená pórovitost - směsi typu B - Libochovice (po 28 dnech)

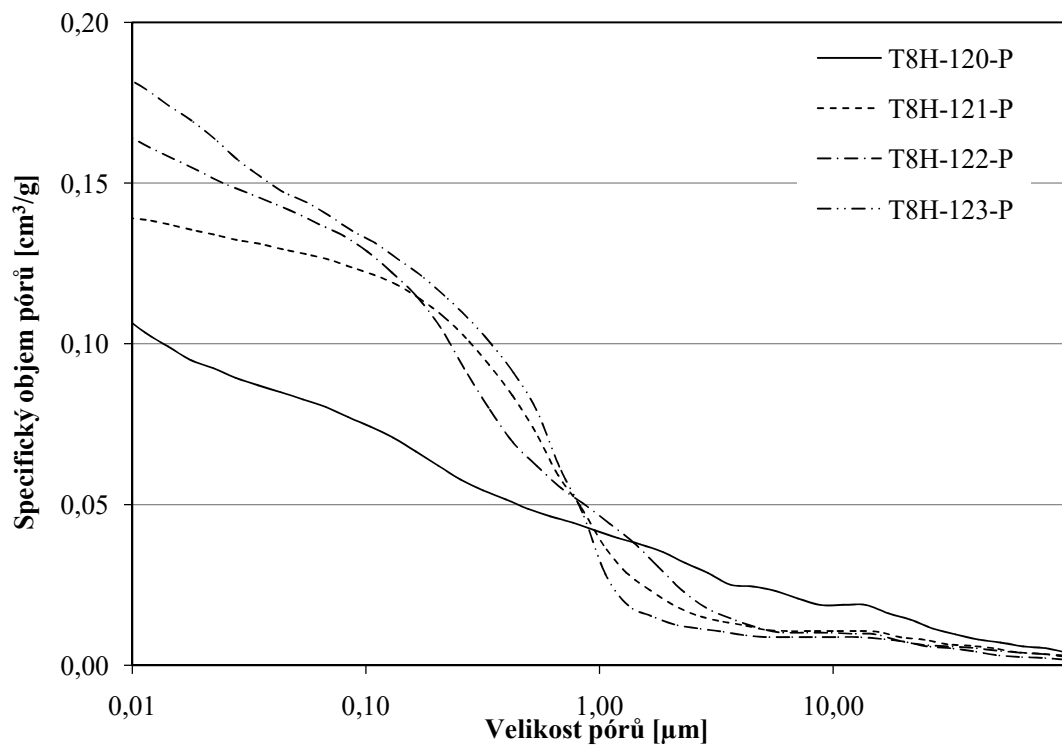
6.2 Struktura materiálu

6.2.1 Směsi typu A

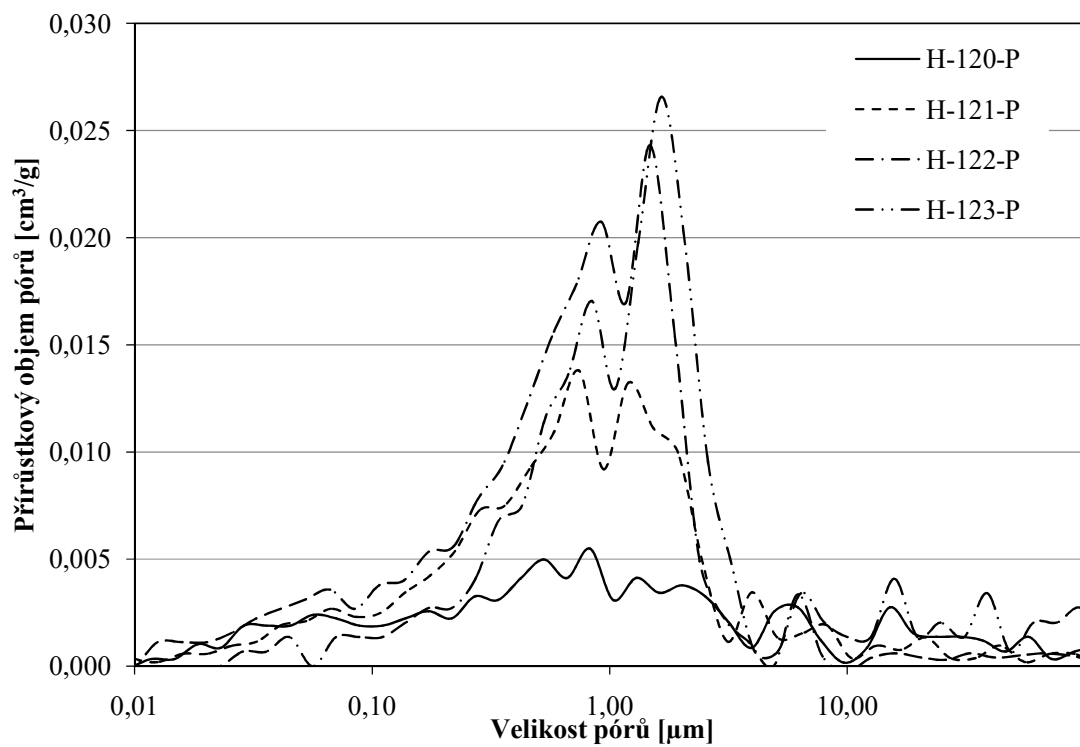
Uspořádání pórového systému je charakterizováno pomocí porozimetrických křivek, které znázorňují specifický objem a přírůstek objemu pórů. Na obrázcích 49 a 50 jsou tyto křivky znázorněny pro směsi typu A z Hevlínského prachu při teplotě zrání 20 °C. Na obrázcích 51 a 52 jsou dále tyto křivky znázorněny také pro směsi typu A z Hevlínského prachu při teplotě ošetření 80 °C.



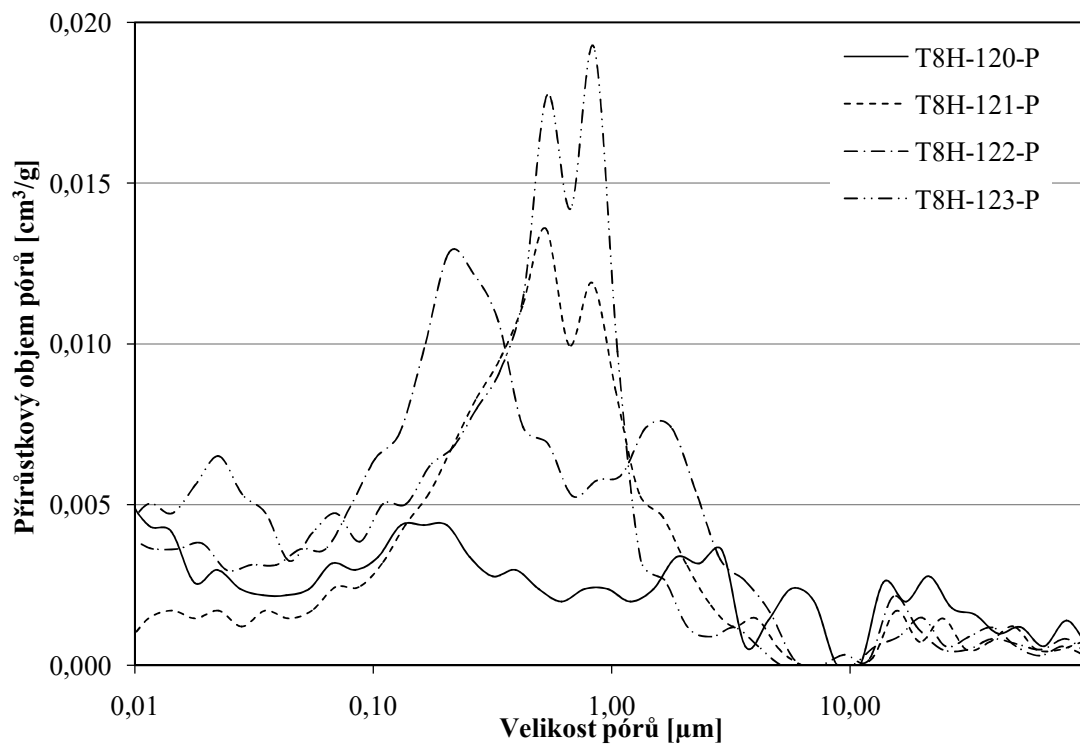
Obr. 49: Měrný objem pórů - směsi typu A - Hevlín 20 °C



Obr. 50: Měrný objem pórů - směsi typu A - Hevlín 80 °C



Obr. 51: Přírůstkový objem pórů – směsi typu A – Hevlín 20 °C

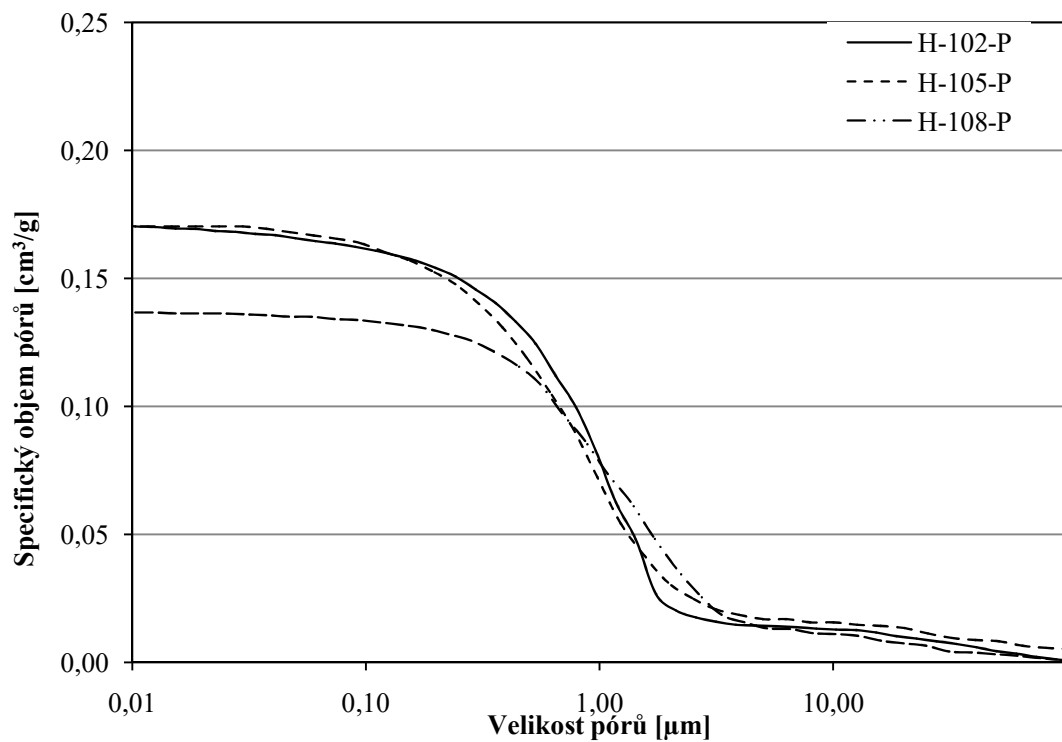


Obr. 52: Přírůstkový objem pórů – směsi typu A – Hevlín 80 °C

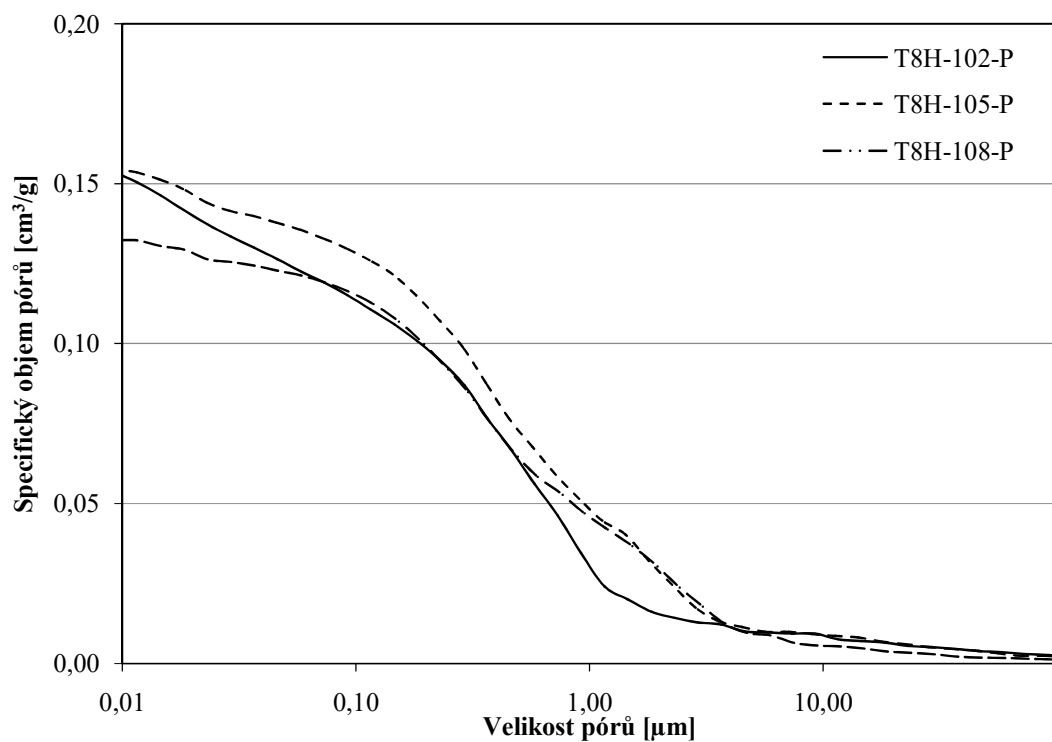
Z grafů je patrné, že se zvyšujícím se Ms roste objem pórů. Lze dále pozorovat, že u směsi typu A došlo k výraznému poklesu velikosti pórů při teplotě ošetření 20 °C v oblasti kolem 1 μm. Při teplotě ošetření 80 °C nastal tento pokles v oblasti od 0,1 do 1 μm.

6.2.2 Směsi typu B

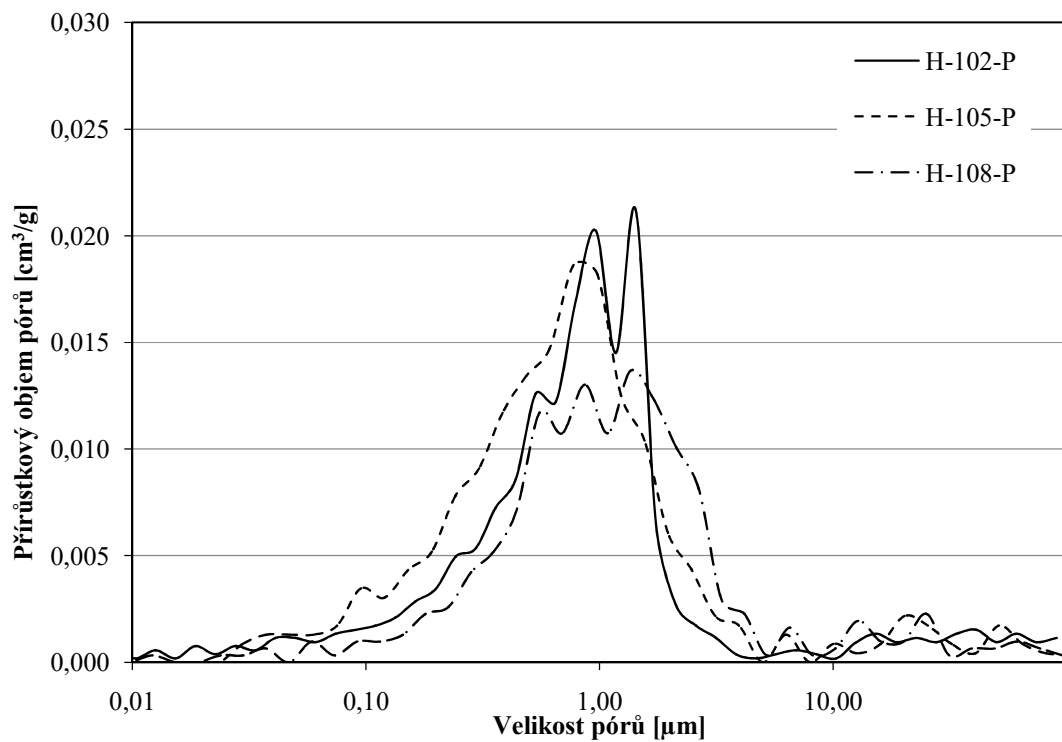
Na obrázcích 53 a 54 jsou tyto křivky znázorněny pro směsi typu B z Hevlínského prachu při teplotě ošetření 20 °C. Na obrázcích 55 a 56 jsou dále tyto křivky znázorněny také pro směsi typu B z Hevlínského prachu při teplotě ošetření 80 °C.



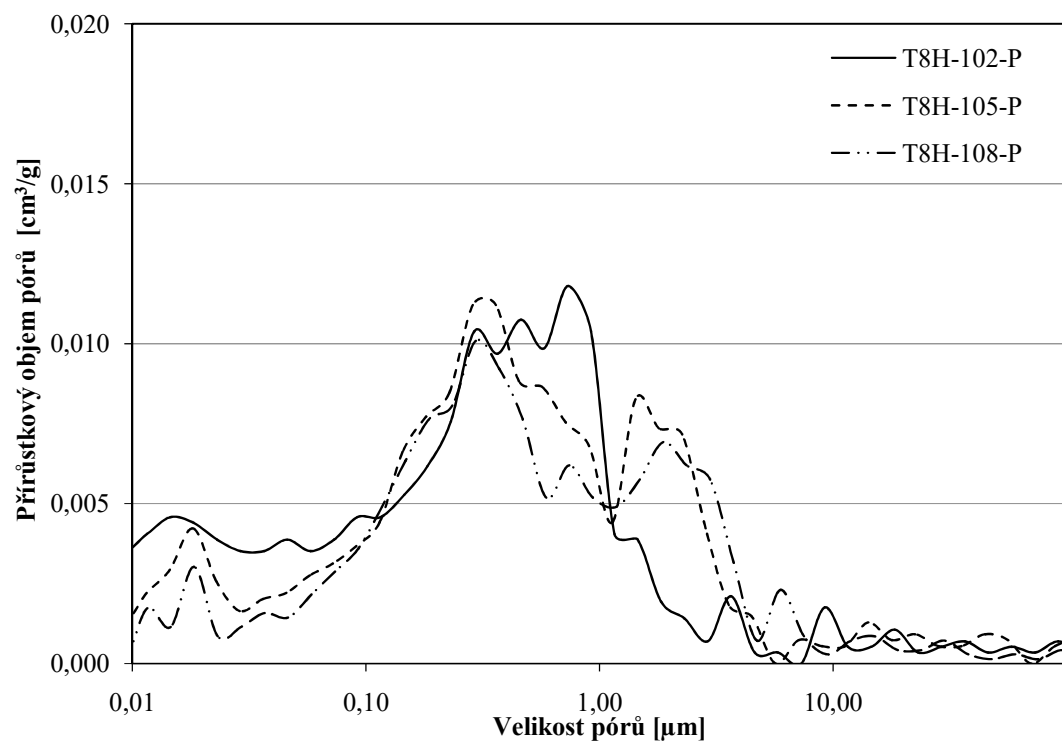
Obr. 53: Specifický objem pórů - směsi typu B - Hevlín 20 °C



Obr. 54: Měrný objem pórů - směsi typu B - Hevlín 80 °C



Obr. 55: Přírůstkový objem pórů – směsi typu B – Hevlín 20 °C



Obr. 56: Přírůstkový objem pórů – směsi typu B – Hevlín 80 °C

Z grafů je patrné, že se zvyšujícím se množstvím vodního skla a NaOH se u materiálu nepatrně snižuje obsah pórů. Z grafů lze dále pozorovat, že výrazný pokles velikosti pórů nastal při teplotě ošetření 20 °C v oblasti kolem 1 μm. Při teplotě ošetření 80 °C nastal tento pokles již v oblasti od 0,1 do 1 μm.

6.3 Mechanické vlastnosti

6.3.1 Směsi typu A – Hevlínský cihelný prach

V tabulkách 23 až 26 jsou uvedeny výsledky mechanických vlastností směsí typu A vyrobených z Hevlínského cihelného prachu.

Tab. 23: Mechanické vlastnosti - referenční teplota - Hevlín

Hevlín - referenční teplota (20 °C)		
Vzorek	Pevnost v tlaku [MPa]	Pevnost v tahu za ohybu [MPa]
	po 28 dnech	po 28 dnech
H-120-P	11,86	2,46
H-121-P	20,46	4,05
H-122-P	24,11	5,11
H-123-P	27,62	6,05

Tab. 24: Mechanická vlastnosti – teplota ošetření 40 °C - Hevlín

Hevlín - teplota 40 °C		
Vzorek	Pevnost v tlaku [MPa]	Pevnost v tahu za ohybu [MPa]
	po 28 dnech	po 28 dnech
H4-120-P	14,71	2,68
H4-121-P	22,37	5,17
H4-122-P	25,57	5,37
H4-123-P	28,76	6,99

Tab. 25: Mechanická vlastnosti – teplota ošetření 60 °C - Hevlín

Hevlín - teplota 60 °C		
Vzorek	Pevnost v tlaku [MPa]	Pevnost v tahu za ohybu [MPa]
	po 28 dnech	po 28 dnech
H6-120-P	16,11	3,57
H6-121-P	23,66	6,01
H6-122-P	26,90	7,28
H6-123-P	29,27	8,63

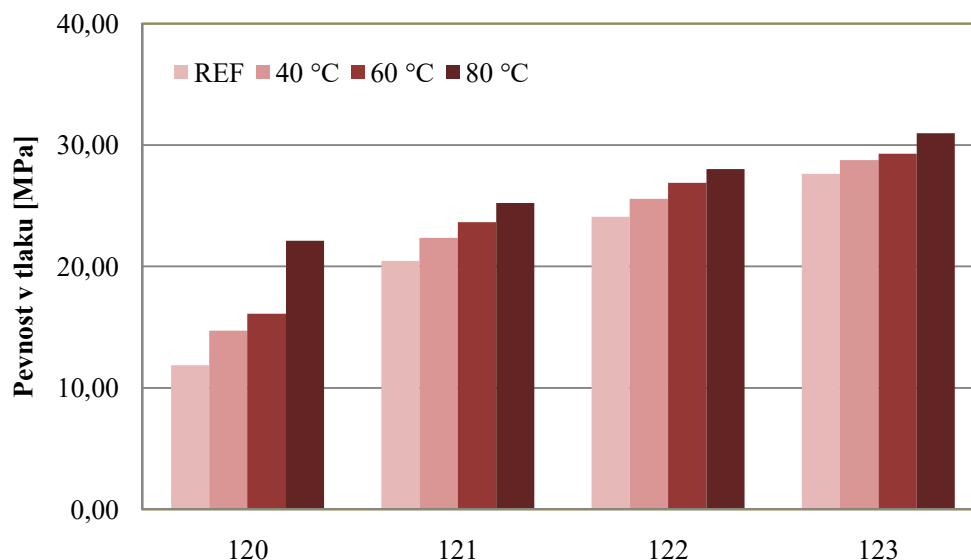
Tab. 26: Mechanická vlastnosti – teplota ošetření 80 °C - Hevlín

Hevlín - teplota 80 °C		
Vzorek	Pevnost v tlaku [MPa]	Pevnost v tahu za ohybu [MPa]
	po 28 dnech	po 28 dnech
H8-120-P	22,12	4,31
H8-121-P	25,23	6,46
H8-122-P	28,02	8,21
H8-123-P	30,96	10,47

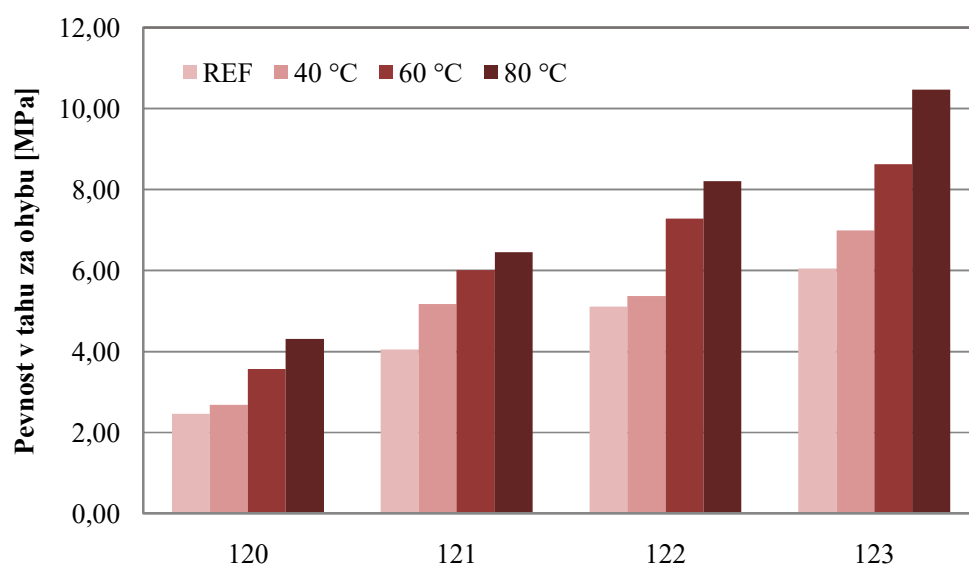
Na obrázcích 57 a 58 jsou shrnuty mechanické vlastnostisměsítypu A vyrobených z Hevlínského prachu. U materiálů 120 až 123 lze pozorovat, že s rostoucím silikátovým modulem rostou hodnoty pevnosti v tlaku. Vzhledem k referenčnímu materiálu H-120-P vykazoval materiál H-123-P zhruba 2,3násobně vyšší hodnotu pevnosti v tlaku. Dále je z grafu patrné, že hodnoty pevnosti v tlaku u jednotlivých materiálů mají rostoucí trend se zvyšující se teplotou ošetření. Stejně chování lze pozorovat i v rámci srovnání jednotlivých typů materiálů. Největší vliv teploty ošetření (80 °C) vzhledem k referenčnímu materiálu byl pozorován u materiálu 120, hodnota pevnosti v tlaku vzrostla zhruba 2násobně. Nejmenší vliv teploty ošetření (80 °C) vzhledem k referenčnímu stavu nastal u materiálu 123 (okolo 12 %).

U pevnosti v tahu za ohybu byl u hodnot také pozorován rostoucí trend se zvyšujícím se silikátovým modulem. Materiál s nejvyšší hodnotou Ms s označením H-123-P vykazoval zhruba 2,5násobně vyšší pevnost v tlaku než materiál H-120-P. Dále je z grafu patrné, že hodnoty u jednotlivých materiálů mají rostoucí trend s rostoucí teplotou ošetření, podobně

jako u hodnot pevnosti v tlaku. Nejvyšší vliv teploty ošetření (80 °C) vzhledem k referenčnímu materiálu byl pozorován u skupin materiálů 120 a 123 (kolem 75 %).



Obr. 57: Pevnost v tlaku - směsi typu A - Hevlín (po 28 dnech)



Obr. 58: Pevnost v tahu za ohybu - směsi typu A - Hevlín (po 28 dnech)

6.3.2 Směsi typu A – Libochovický cihelný prach

V tabulkách 27 až 30 jsou uvedeny výsledky mechanických vlastností směsí typu A vyrobených z Libochovického cihelného prachu.

Tab. 27: Mechanická vlastnosti - referenční teplota - Libochovice

Libochovice - referenční teplota (20 °C)		
Vzorek	Pevnost v tlaku [MPa]	Pevnost v tahu za ohybu [MPa]
	po 28 dnech	po 28 dnech
L-120-P	47,05	3,40
L-121-P	46,77	6,47
L-122-P	39,71	7,26
L-123-P	30,67	7,28

Tab. 28: Mechanická vlastnosti – teplota ošetření 40 °C – Libochovice

Libochovice - teplota 40 °C		
Vzorek	Pevnost v tlaku [MPa]	Pevnost v tahu za ohybu [MPa]
	po 28 dnech	po 28 dnech
L4-120-P	60,09	4,07
L4-121-P	58,52	6,82
L4-122-P	57,54	7,82
L4-123-P	48,59	9,08

Tab. 29: Mechanická vlastnosti – teplota ošetření 60 °C - Libochovice

Libochovice - teplota 60 °C		
Vzorek	Pevnost v tlaku [MPa]	Pevnost v tahu za ohybu [MPa]
	po 28 dnech	po 28 dnech
L6-120-P	70,88	4,27
L6-121-P	69,33	7,90
L6-122-P	67,57	8,35
L6-123-P	66,80	9,12

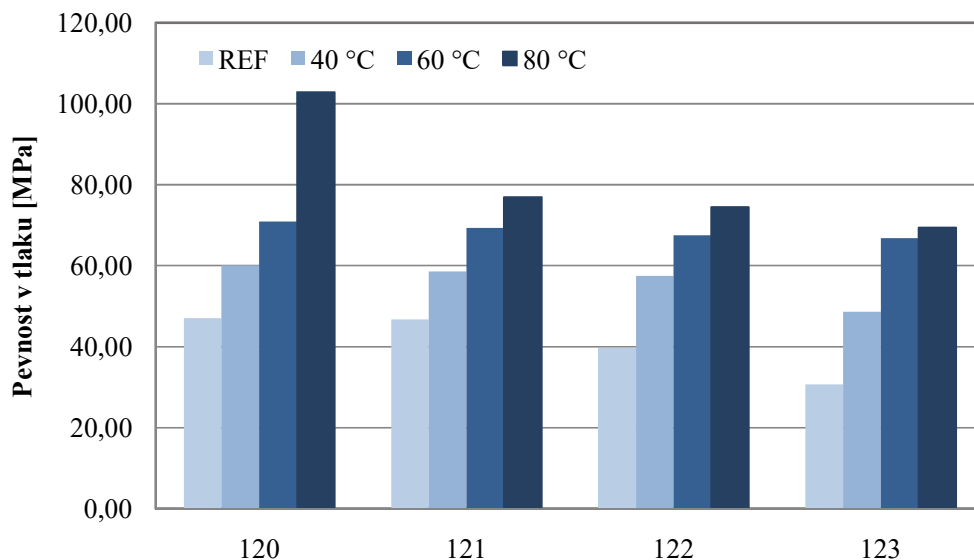
Tab. 30: Mechanická vlastnosti – teplota ošetření 80 °C - Libochovice

Libochovice - teplota 80 °C		
Vzorek	Pevnost v tlaku [MPa]	Pevnost v tahu za ohybu [MPa]
	po 28 dnech	po 28 dnech
L8-120-P	102,86	5,92
L8-121-P	76,94	8,10
L8-122-P	74,45	9,52
L8-123-P	69,41	9,71

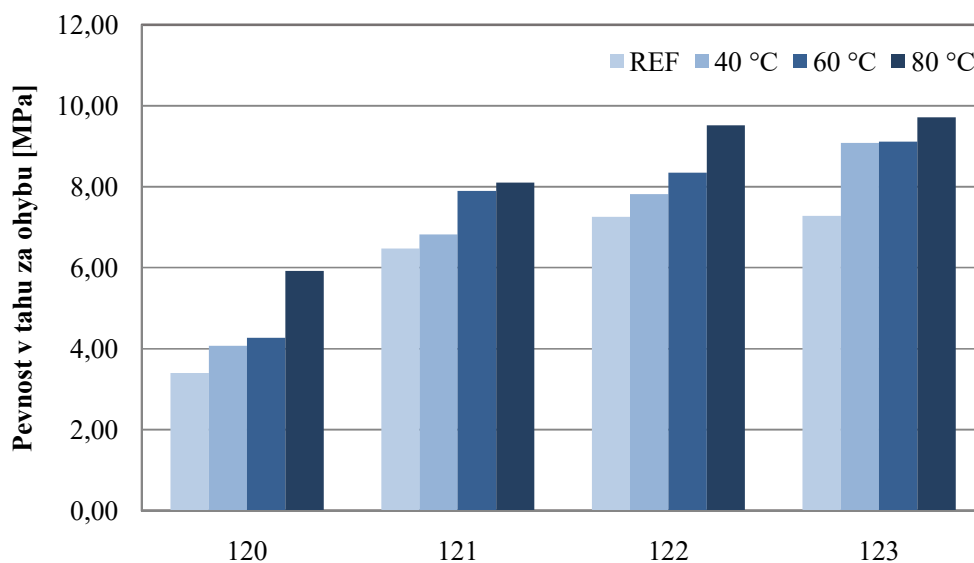
Na obrázcích 59 a 60 jsou shrnuty mechanické vlastnosti směsí typu A vyrobených z Libochovického prachu. U vzorků 120 až 123 lze pozorovat, že s rostoucím silikátovým modulem klesají hodnoty pevnosti v tlaku. Materiál s označením L-123-P vykazoval přibližně o 35 % nižší hodnotu pevnosti v tlaku než materiál s označením L-120-P.

Dále je z grafu patrné, že hodnoty pevnosti v tlaku u jednotlivých materiálů mají rostoucí charakterse zvyšující se teplotou ošetření, stejný trend lze pozorovat i v rámci srovnání jednotlivých typů materiálů mezi sebou. Referenční materiál vykazoval více jak 2násobně vyšší hodnoty pevnosti v tlaku po teplotním ošetření 80 °C (L8-120-P) než při ošetření v běžných laboratorních podmínkách (L-120-P). Nejmenší vliv teploty ošetření (80 °C) vzhledem k referenčnímu materiálu byl pozorován u materiálu 122, hodnota pevnosti v tlaku vzrostla zhruba o 65 %.

U pevnosti v tahu za ohybu lze pozorovat, že s rostoucí hodnotou M_s vzrostla u materiálu hodnota pevnosti. Materiál s označením L-123-P vykazoval více jak 2násobně vyšší hodnotu pevnosti v tahu za ohybu než materiál s označením L-120-P. Dále je patrné, že hodnoty pevnosti v tahu za ohybu mají u všech typů materiálu (120, 121, 122, 123) rostoucí trend s rostoucí teplotou ošetření. Největší nárůst pevnosti po ošetření 80 °C vzhledem k referenčnímu stavu byl u materiálu 120 (okolo 75 %).



Obr. 59: Pevnost v tlaku - směsi typu A - Libochovice (po 28 dnech)



Obr. 60: Pevnost v tahu za ohybu - směsi typu A - Libochovice (po 28 dnech)

6.3.3 Směsi typu B – Hevlínský cihelný prach

V tabulkách 31 až 34 jsou uvedeny výsledky mechanických vlastností směsí typu B vyrobených z Hevlínského cihelného prachu.

Tab. 31: Mechanická vlastnosti - referenční teplota – Hevlín

Hevlín - referenční teplota (20 °C)		
Vzorek	Pevnost v tlaku [MPa]	Pevnost v tahu za ohybu [MPa]
	po 28 dnech	po 28 dnech
H-102-P	33,46	9,46
H-105-P	32,41	7,61
H-108-P	29,02	4,09

Tab. 32: Mechanická vlastnosti – teplota ošetření 40 °C – Hevlín

Hevlín - teplota 40 °C		
Vzorek	Pevnost v tlaku [MPa]	Pevnost v tahu za ohybu [MPa]
	po 28 dnech	po 28 dnech
H4-102-P	35,71	5,04
H4-105-P	34,58	3,65
H4-108-P	31,13	2,03

Tab. 33: Mechanická vlastnosti – teplota ošetření 60 °C – Hevlín

Hevlín - teplota 60 °C		
Vzorek	Pevnost v tlaku [MPa]	Pevnost v tahu za ohybu [MPa]
	po 28 dnech	po 28 dnech
H6-102-P	36,94	3,37
H6-105-P	35,04	2,83
H6-108-P	32,47	1,15

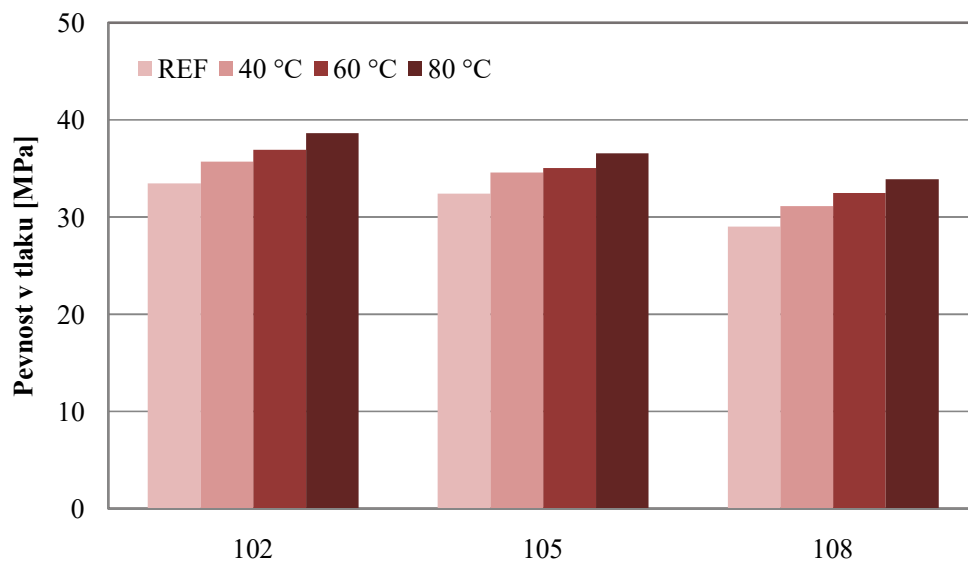
Tab. 34: Mechanická vlastnosti – teplota ošetření 80 °C – Hevlín

Hevlín - teplota 80 °C		
Vzorek	Pevnost v tlaku [MPa]	Pevnost v tahu za ohybu [MPa]
	po 28 dnech	po 28 dnech
H8-102-P	38,65	2,74
H8-105-P	36,57	2,03
H8-108-P	33,89	0,67

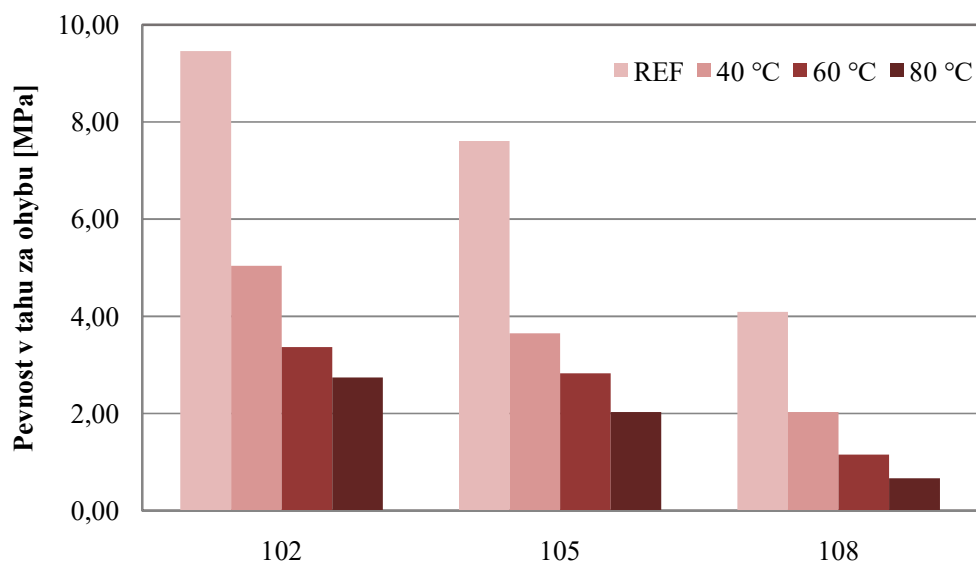
Na obrázku 61 jsou shrnuty hodnoty pevnosti v tlaku směsí typu B vyrobených z Hevlínského prachu. U materiálů 102 až 108 lze pozorovat, že nastal pokles hodnot se zvyšujícím se množstvím vodního skla a NaOH ve směsi. Materiál H-108-P vykazoval zhruba o 13 % nižší hodnotu pevnosti v tlaku oproti materiálu H-102-P.

Dále je z grafu patrné, že hodnoty mají rostoucí charakter s rostoucí teplotou ošetření (podobně jak u směsí typu A). Rozdíl hodnot pevnosti v tlaku vzhledem k teplotě ošetření (20 °C x 80 °C) byl u materiálů 102, 105 a 108 podobný (kolem 15 %).

Na obrázku 62 jsou shrnuty hodnoty pevnosti v tahu za ohybu směsí typu B – Hevlín. Mezi materiály 102 a 108 nastal pokles hodnot se zvyšujícím se množstvím vodního skla a NaOH ve směsi. Materiál H-102-P vykazoval více jak 2násobně vyšší hodnotu pevnosti v tahu za ohybu oproti materiálu H-108-P. Dále lze pozorovat, že u hodnot pevnosti v tahu za ohybu u jednotlivých materiálů nastal klesající trend s rostoucí teplotou ošetření. Výrazný pokles hodnot mezi referenční teplotou a teplotou ošetření 80 °C nastal u materiálu 108 (zhruba 6násobný). U ostatních materiálů (102 a 105) byl rozdíl hodnot pevnosti v tahu za ohybu referenčního materiálu a materiálu ošetřeného při 80 °C menší než u materiálu 108, přibližně 3,5násobný.



Obr. 61: Pevnost v tlaku - směsi typu B - Hevlín (po 28 dnech)



Obr. 62: Pevnost v tahu za ohybu - směsi typu B - Hevlín (po 28 dnech)

6.3.4 Směsi typu B – Libochovický cihelný prach

V tabulkách 35 až 38 jsou uvedeny výsledky mechanických vlastností směsí typu B vyrobených z Libochovického cihelného prachu.

Tab. 35: Mechanická vlastnosti - referenční teplota - Libochovice

Libochovice - referenční teplota (20 °C)		
Vzorek	Pevnost v tlaku [MPa]	Pevnost v tahu za ohybu [MPa]
	po 28 dnech	po 28 dnech
L-102-P	42,83	11,64
L-105-P	46,58	7,48
L-108-P	51,03	6,53

Tab. 36: Mechanická vlastnosti – teplota ošetření 40 °C – Libochovice

Libochovice - teplota 40 °C		
Vzorek	Pevnost v tlaku [MPa]	Pevnost v tahu za ohybu [MPa]
	po 28 dnech	po 28 dnech
L4-102-P	58,48	11,19
L4-105-P	64,22	8,25
L4-108-P	69,37	7,91

Tab. 37: Mechanická vlastnosti – teplota ošetření 60 °C - Libochovice

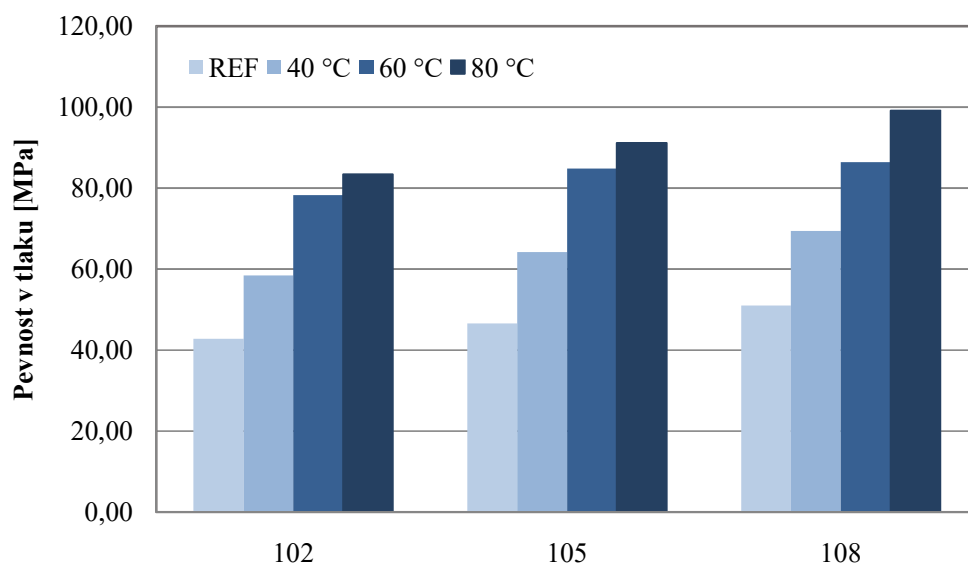
Libochovice - teplota 60 °C		
Vzorek	Pevnost v tlaku [MPa]	Pevnost v tahu za ohybu [MPa]
	po 28 dnech	po 28 dnech
L6-102-P	78,27	7,52
L6-105-P	84,85	8,30
L6-108-P	86,40	9,09

Tab. 38: Mechanická vlastnosti – teplota ošetření 80 °C - Libochovice

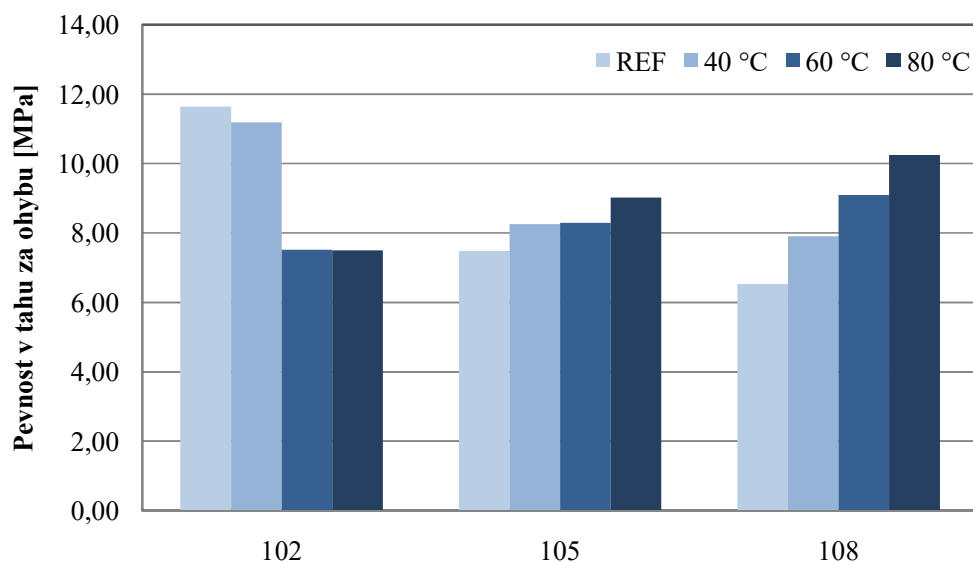
Libochovice - teplota 80 °C		
Vzorek	Pevnost v tlaku [MPa]	Pevnost v tahu za ohybu [MPa]
	po 28 dnech	po 28 dnech
L8-102-P	83,42	7,50
L8-105-P	91,20	9,02
L8-108-P	99,14	10,25

Na obrázcích 63 a 64 jsou shrnuty mechanické vlastnosti směsí typu B vyrobených z Libochovického prachu. U materiálů 102, 105 a 108 lze pozorovat, že u hodnot pevnosti v tlaku nastal rostoucí trend se zvyšujícím se množstvím vodního skla a NaOH ve směsi. Rozdíl mezi materiály L-102-P a L-108-P se pohyboval kolem 19 %. Dále je z grafu patrné, že hodnoty pevnosti v tlaku u jednotlivých materiálů (podobně jako u směsí typu A) mají rostoucí charakter se zvyšující se teplotou ošetření. Rozdíl hodnot pevností v tlaku u materiálů 102, 105 a 108 po teplotním ošetření 80 °C vzhledem k referenční teplotě se pohyboval u všech materiálů podobně, byl zhruba 2násobný.

U pevnosti v tahu za ohybu při referenční teplotě lze pozorovat, že u hodnot nastal klesající trend se zvyšujícím se množstvím vodního skla a NaOH ve směsi. Materiál L-102-P vykazuje přibližně 2násobně vyšší hodnotu pevnosti v tahu za ohybu oproti materiálu L-108-P.



Obr. 63: Pevnost v tlaku - směsi typu B - Libochovice (po 28 dnech)



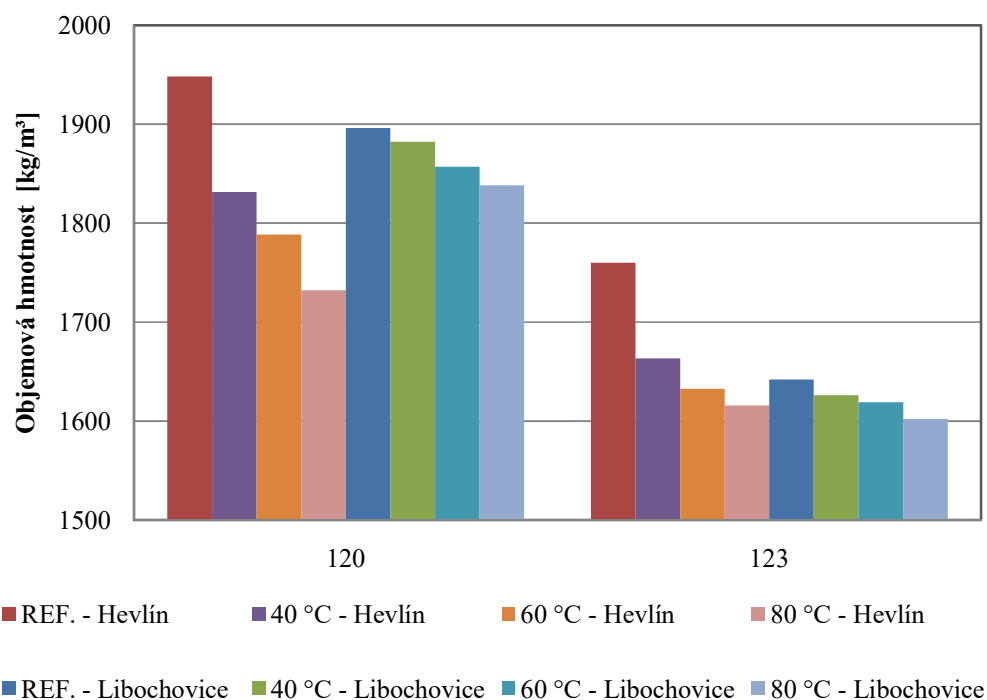
Obr. 64: Pevnost v tahu za ohybu - směsi typu B - Libochovice (po 28 dnech)

6.4 Porovnání vybraných vlastností

6.4.1 Směsi typu A

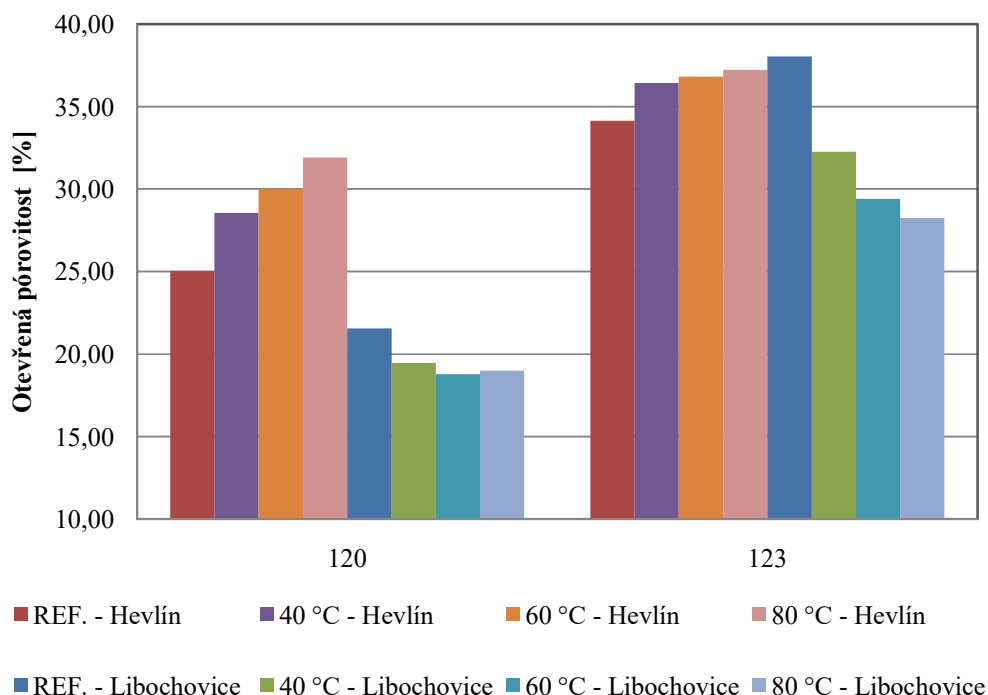
V rámci studie byly zkoumány dva typy cihelných prachů. V této kapitole jsou porovnány některé vlastnosti z těchto prachů vyrobených. Ze základních fyzikálních vlastností se jedná o objemovou hmotnost a otevřenou pórovitost. Z mechanických vlastností se jedná o pevnost v tlaku. V rámci skupiny A jsou mezi sebou porovnávány směsi 120 a 123.

Na obrázku 65 jsou mezi sebou porovnány hodnoty objemové hmotnosti směsí 120 a 123 vyrobených z Hevlínského a z Libochovického prachu. Rozdíl mezi hodnotami objemové hmotnosti u referenčních materiálů vyrobených z Hevlínského a Libochovického prachu byl u směsi 120 o zhruba 3 % a u směsi 123 o přibližně 7 %. Při teplotě ošetření 80 °C byl rozdíl hodnot mezi oběma typy prachů u materiálu 120 o přibližně 5 %, u materiálu 123 vyšly hodnoty objemové hmotnosti podobně. U materiálů z obou typů prachů lze u hodnot objemové hmotnosti pozorovat klesající charakter se zvyšujícím se M_s , přičemž u obou typů prachů nastal podobný pokles (kolem 13 %). U hodnot objemové hmotnosti lze dále pozorovat u obou typů prachů klesající trend s rostoucí teplotou ošetření, přičemž u skupin materiálů 120 a 123 z Hevlínského prachu to bylo zhruba o 10 %. U skupin materiálů 120 a 123 z Libochovického prachu byl pokles u hodnot objemové hmotnosti zhruba jen o 3 %.



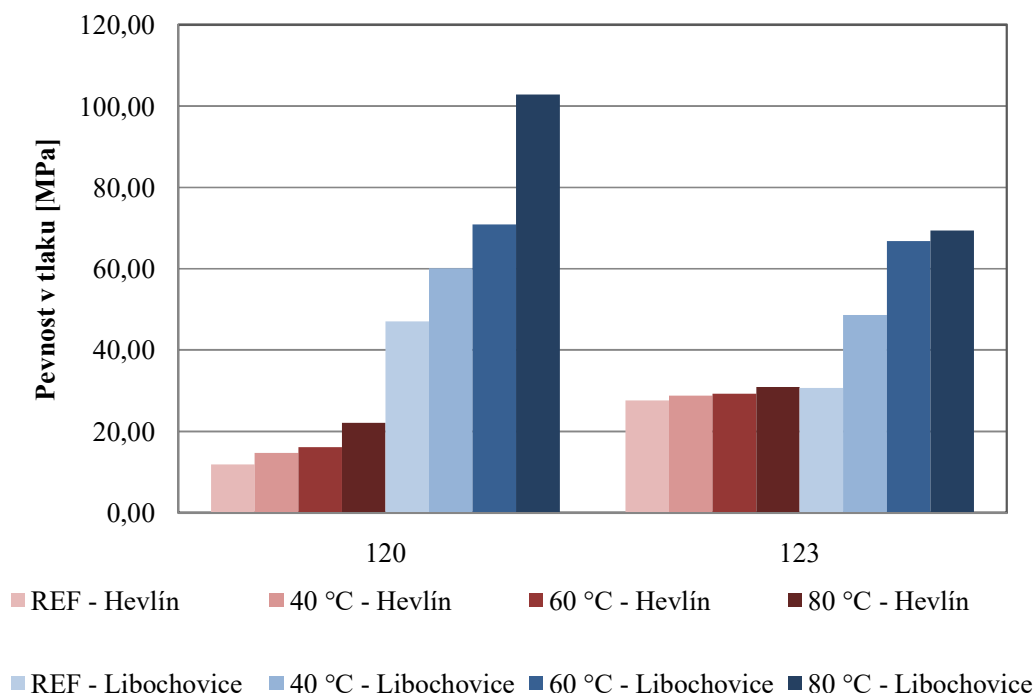
Obr. 65: Objemová hmotnost - porovnání hodnot materiálů 120 a 123

Na obrázku 66 jsou mezi sebou porovnány hodnoty otevřené pórovitosti směsí 120 a 123 vyrobených z Hevlínského a Libochovického prachu. Lze pozorovat, že u obou typů prachů nastal u hodnot rostoucí charakter s rostoucí hodnotou silikátového modulu. U materiálů z Hevlínského prachu byl nárůst hodnot zhruba o 36 % a u směsí z Libochovického prachu hodnoty vzrostly zhruba o 76 %. Z grafu lze dále pozorovat, že materiály vyrobené z Libochovického prachu vykazují při zvýšené teplotě ošetření nižší hodnoty otevřené pórovitosti než materiály vyrobené z Hevlínského prachu. Dále je patrné, že u hodnot otevřené pórovitosti nastalo u materiálů z Hevlínského a Libochovického prachu rozdílné chování s rostoucí teplotou ošetření. U materiálů z Hevlínského prachu byl zaznamenán rostoucí trend hodnot s rostoucí teplotou, přičemž u materiálu 120 to bylo kolem 28 % a u materiálu 123 se jednalo zhruba o 9 %. U materiálů z Libochovického prachu lze pozorovat klesající charakter hodnot s rostoucí teplotou ošetření. U materiálu 120 byl pokles hodnot přibližně 13 %, u směsi 123 nastal pokles hodnot zhruba o 26 %.



Obr. 66: Otevřená pórovitost - porovnání hodnot materiálů 120 a 123

Na obrázku 67 jsou mezi sebou porovnány hodnoty pevnosti v tlaku materiálů 120 a 123 vyrobených z Hevlínského a Libochovického prachu. U hodnot lze na první pohled pozorovat, že materiály vyrobené z Libochovického prachu vykazují vyšší hodnoty pevnosti v tlaku než materiály vyrobené z prachu Hevlínského. Při referenční teplotě to bylo u materiálu 120 zhruba 4násobně a u materiálu 123 o přibližně 10 % (při teplotě ošetření 80 °C byl rozdíl hodnot pevnosti v tlaku u materiálu 120 více jak 4 násobný a materiálu 123 zhruba 2násobný). U materiálů z Hevlínského prachu nastal u hodnot pevnosti v tlaku mezi materiály 120 a 123 se hodnoty zvyšovaly se zvyšujícím se Ms (zhruba 2,3násobný). U materiálů z Libochovického prachu lze pozorovat u hodnot klesající charakter se zvyšujícím se silikátovým modulem (přibližně o 35%). Dále je z grafu patrné, že hodnoty pevnosti v tlaku materiálů z obou typů prachů mají rostoucí charakter se zvyšující se teplotou ošetření. U směsi z Hevlínského prachu hodnota se zvyšující se teplotou ošetření (80 °C) oproti referenčnímu stavu vzrostla u materiálu 120 skoro 2násobně a u materiálu 123 o přibližně 12 %. U materiálů z Libochovického prachu hodnoty pevnosti v tlaku s rozdílnou teplotou ošetření (20 °C x 80 °C) vzrostly u směsi 120 a 123 na více jak 2násobek.



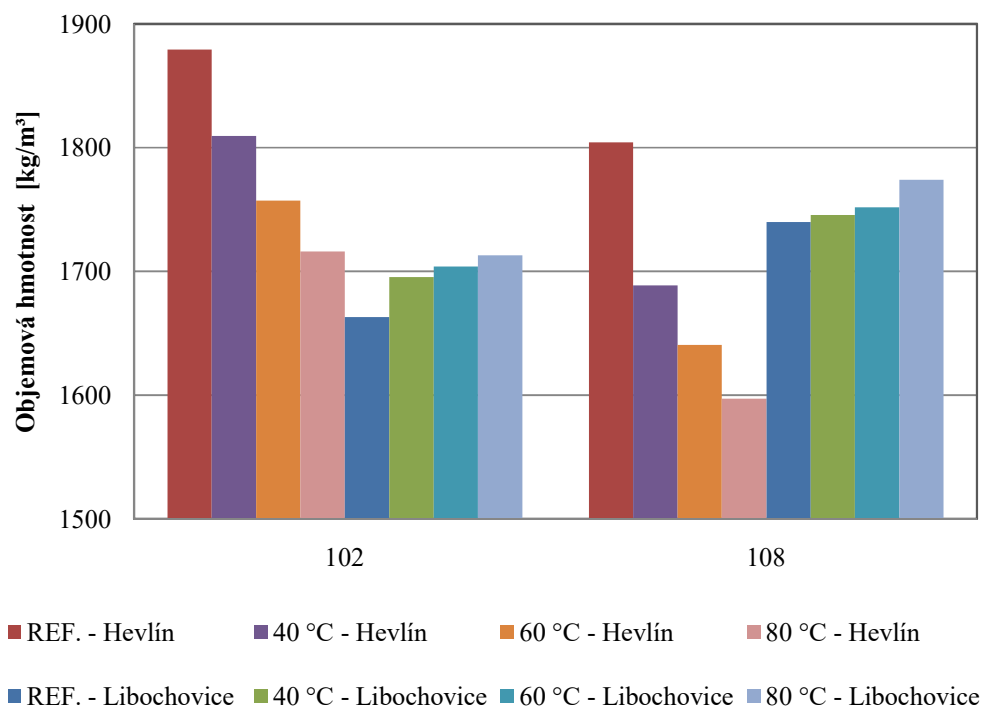
Obr. 67: Pevnost v tlaku - porovnání hodnot materiálů 120 a 123

6.4.2 Směsi typu B

V rámci skupiny B jsou mezi sebou porovnány materiály 102 a 108. U těchto materiálů jsou mezi sebou porovnávány hodnoty objemové hmotnosti, otevřené pórovitosti a pevnosti v tlaku.

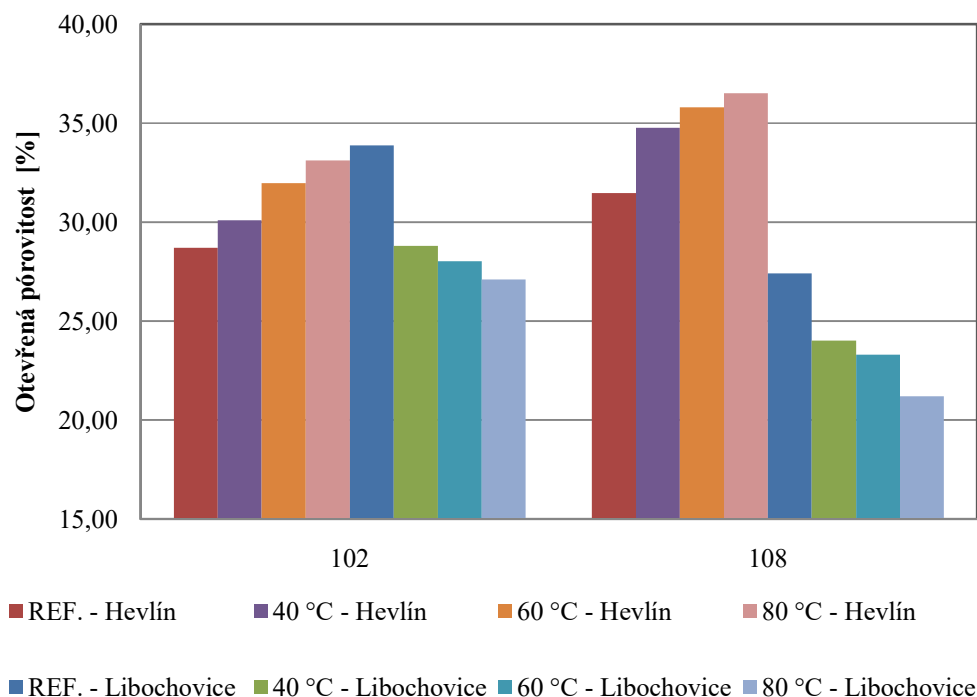
Na obrázku 68 jsou mezi sebou porovnány hodnoty objemové hmotnosti materiálů 102 a 108 vyrobených z Hevlínského a Libochovického prachu. U materiálů vyrobených z Hevlínského prachu lze pozorovat klesající charakter u hodnot objemové hmotnosti se zvyšujícím se množstvím vodního skla a NaOH ve směsi (okolo 4 %), u materiálů z Libochovického prachu nastal u hodnot trend opačný, tedy rostoucí se zvyšujícím se množstvím vodního skla a NaOH ve směsi (také okolo 4 %). Rozdíl u hodnot objemové hmotnosti mezi Hevlínem a Libochovicemi byl u materiálu 102 zhruba 13 % a u materiálu 108 přibližně 4 % (při teplotě ošetření 20 °C). U teploty ošetření 80 °C vyšly u materiálu 102 hodnoty podobně, u materiálu 108 byl rozdíl hodnot objemové hmotnosti kolem 10 %. Z grafu lze dále pozorovat, že u materiálů vyrobených z Hevlínského prachu nastal u hodnot objemové hmotnosti klesající charakter s rostoucí teplotou ošetření, přičemž u materiálů 102 a 108 to bylo okolo 10 %. U materiálů z Libochovického prachu se hodnota objemové

hmotnosti zvyšovala s rostoucí teplotou ošetření, u obou typů materiálů (102 a 108) byl dosažen u hodnot nárůst přibližně o 3 %.



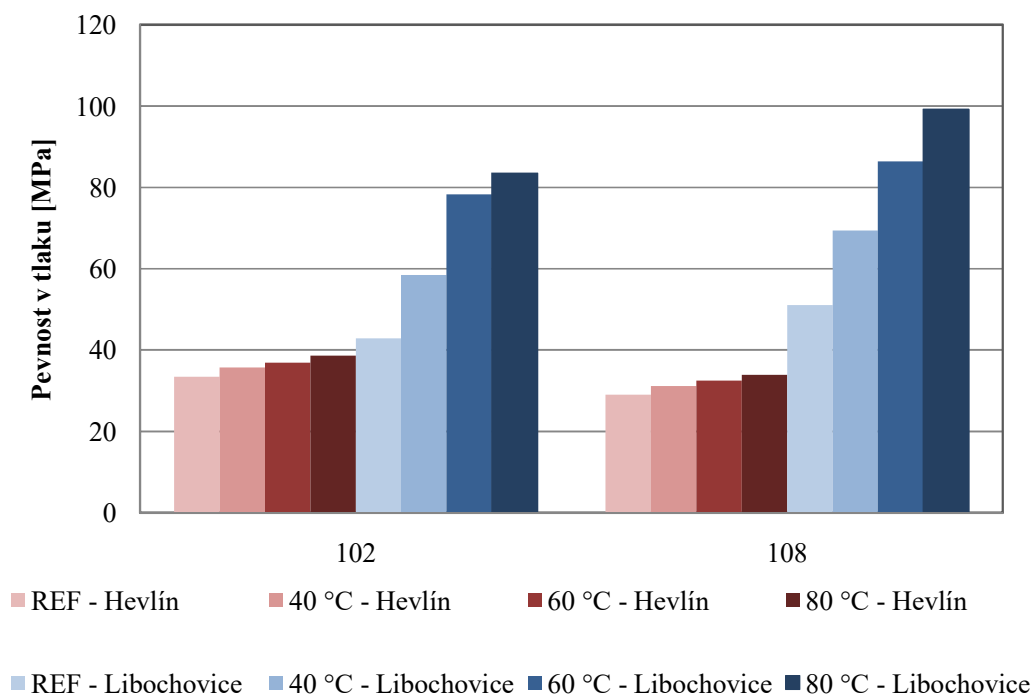
Obr. 68: Objemová hmotnost - porovnání hodnot materiálů 102 a 108

Na obrázku 69 jsou mezi sebou porovnány hodnoty otevřené pórovitosti materiálů 102 a 108 vyrobených z Hevlínského a Libochovického prachu. Z grafu je patrné, že materiály vyrobené z Libochovického prachu vykazují nižší hodnotu otevřené pórovitosti při zvýšené teplotě ošetření (40, 60 a 80 °C) než materiály vyrobené z Hevlínského prachu. U materiálů vyrobených z Hevlínského prachu lze pozorovat, že u hodnoty otevřené pórovitosti nastal rostoucí charakter se zvyšujícím se množstvím vodního skla a NaOH ve směsi (přibližně 9 %). U směsí z Libochovického prachu nastal u hodnot otevřené pórovitosti trend opačný, tedy klesající se zvyšujícím se množstvím vodního skla a NaOH ve směsi (kolem 20 %). Z grafu je dále patrné, že u materiálů 102 a 108 vyrobených z Hevlínského prachu nastal u hodnot otevřené pórovitosti rostoucí charakter se zvyšující se teplotou ošetření (zhruba 10 %). U materiálů z Libochovického prachu nastal u hodnot otevřené pórovitosti rostoucí trend s rostoucí teplotou ošetření, přičemž u směsi 102 to bylo o přibližně 20 % a u materiálu 108 to bylo zhruba o 23 %.



Obr. 69: Otevřená pórovitost - porovnání hodnot materiálů 102 a 108

Na obrázku 70 jsou mezi sebou porovnány hodnoty pevnosti v tlaku materiálů 102 a 108 vyrobených z Hevlínského a Libochovického prachu. Lze pozorovat, že materiály vyrobené z Libochovického prachu vykazují vyšší hodnoty pevnosti v tlaku než materiály vyrobené z Hevlínského prachu, u materiálu 102 to bylo o zhruba 28 % a u materiálu 108 o přibližně 75 % při referenční teplotě ošetření. U teploty ošetření 80 °C nastal rozdíl hodnot u materiálu 102 více jak 2násobný a u materiálu 108 byl rozdíl hodnot skoro 3násobný. U materiálů vyrobených z Hevlínského prachu lze pozorovat, že u hodnot pevnosti v tlaku nastal klesající trend se zvyšujícím se množstvím vodního skla a NaOH ve směsi (zhruba 13 %). U směsi z Libochovického prachu nastal u hodnot pevnosti v tlaku rostoucí charakter se zvyšujícím se množstvím vodního skla a NaOH ve směsi (kolem 19 %). Dále lze z grafu pozorovat, že u obou materiálů (102 a 105) vyrobených jak z Hevlínského, tak i z Libochovického prachu nastal u hodnot rostoucí trend se zvyšující se teplotou ošetření, přičemž u obou materiálů z Hevlínského prachu to bylo zhruba o 15 %. U materiálů 102 a 108 z Libochovického prachu byl nárůst hodnot zhruba 2násobný.



Obr. 70: Pevnost v tlaku - porovnání hodnot materiálů 102 a 108

7 Závěr

Cílem této práce bylo studium alkalicky aktivovaného materiálu vyrobeného z cihelného prachu od společnosti Heluz cihlářský průmysl v.o.s., který vzniká jako odpadní materiál při výrobě cihelných tvarovek. Porovnávány mezi sebou byly dva cihelné prachy, z Hevlína a z Libochovic. Oba cihelné prachy byly prosety na velikost zrn pod 1 mm. Byl zkoumán vliv zvýšené teploty ošetření u 7 vybraných směsí, jejichž receptury vznikly ve spolupráci s prof. Pavlou Rovnaníkovou z VUT v Brně. První 4 materiály (směsi typu A) obsahovaly stejné množství cihelného prachu, vodního skla a vody, měnilo se množství hydroxidu sodného. Hodnota silikátového modulu M_s se pohybovala v rozmezí od 0,8 do 1,2. Další 3 materiály (směsi typu B) obsahovaly pouze stejné množství cihelného prachu. U zbylých surovin bylo množství proměnlivé, aby byl u směsí zachován stejný silikátový modul M_s s hodnotou 1,4. Vyrobené směsi byly zkoumány z hlediska základních fyzikálních a mechanických vlastností. Porézní systém byl zkoumán jen u směsí z Hevlínského prachu.

Z experimentálních výsledků u směsí typu A je patrné, že u hodnot objemové hmotnosti nastal u materiálů z Hevlínského a z Libochovického prachu klesající trend jak se zvyšujícím se silikátovým modulem, tak i s rostoucí teplotou ošetření. U otevřené pórovitosti lze pozorovat, že materiály z obou typů prachů vykazovaly u hodnot také rostoucí charakter se zvyšujícím se M_s . U směsí z Hevlínského prachu byl dále u hodnot pozorován rostoucí trend s rostoucí teplotou ošetření. U materiálů z Libochovického prachu byl při stejných podmínkách (se zvyšující se teplotou ošetření) pozorován u hodnot otevřené pórovitosti klesající trend. U mechanických vlastností je patrné, že u hodnot pevnosti v tlaku byl dosažen u materiálu z Hevlínského prachu rostoucí trend se zvyšujícím se silikátovým modulem. U materiálu z Libochovického prachu nastal opačný charakter, tedy klesající se zvyšujícím se M_s . U materiálů z obou typů prachů byl pozorován u hodnot pevnosti v tlaku rostoucí charakter se zvyšující se teplotou ošetření.

Z výsledků u směsí typu B lze pozorovat, že u hodnot objemové hmotnosti u materiálů z Hevlínského prachu nastal klesající trend nejen se zvyšujícím se množstvím vodního skla a NaOH ve směsi, ale i se zvyšující se teplotou ošetření u jednotlivých skupin materiálů (102, 105 a 108). U materiálu z Libochovického prachu nastalo chování opačné, tedy že hodnoty objemové hmotnosti vzrostly jak se zvyšujícím se množstvím vodního skla a NaOH ve směsi, tak i se zvyšující se teplotou ošetření. U hodnot otevřené pórovitosti nastal u směsí

z Hevlínského prachu rostoucí charakter se zvyšujícím se množstvím vodního skla a NaOH ve směsi. Stejný trend u hodnot byl dosažen i se zvyšující se teplotou ošetření. U materiálů z Libochovického prachu se u hodnot projevil opačný charakter oproti Hevlínu, tedy že hodnoty otevřené pórovitosti měly klesající trend jak se zvyšujícím se množstvím vodního skla a NaOH ve směsi, tak i se zvyšující se teplotou ošetření. U hodnot pevnosti v tlaku nastal u materiálů z Hevlínského prachu klesající charakter se zvyšujícím se množstvím vodního skla a NaOH ve směsi. U směsí z Libochovického prachu byl u hodnot trend rostoucí se zvyšujícím se množstvím vodního skla a NaOH ve směsi.

U všech materiálů vyrobených z obou typů prachů lze tedy pozorovat, že u hodnot pevnosti v tlaku se zlepšily mechanické vlastnosti se zvyšující se teplotou ošetření. To znamená, že zvyšující se teplota ošetření má pozitivní vliv na hodnoty pevnosti v tlaku. U materiálů z Libochovického prachu hodnoty mechanických vlastností vyšly v souladu s hodnotami otevřené pórovitosti, tedy že s klesající hodnotou pórovitosti u materiálu stoupají hodnoty mechanických vlastností (pevnosti v tlaku a v tahu za ohybu). U materiálů z Hevlínského prachu hodnoty mechanických vlastností nevyšly v souladu s hodnotami pórovitosti. To může být pravděpodobně způsobeno tím, že u alkalicky aktivovaných materiálu dochází k složitým strukturálním změnám.

Geopolymerní materiály jsou materiály s velkým potenciálem použití. Svými vlastnostmi by mohly při určitých aplikacích nahradit běžně používané materiály nejen ve stavebnictví. Jejich výhodu představuje také jejich méně ekologicky a ekonomicky náročná výroba, oproti výrobě cementu. Mohou se tak řadit mezi materiály, které jsou šetrné svou výrobou k životnímu prostředí. Pro použití geopolymerních materiálů ve stavebním průmyslu je však zapotřebí se ještě více zabývat studováním jejich vnitřní struktury, pro hlubší pochopení vztahů mezi vnitřní strukturou a mechanickými vlastnostmi.

Literatura

- [1] Geopolymery. Matrix-2012.cz [online]. [cit. 2017-10-10]. Dostupné z: http://www.matrix-2012.cz/index.php?option=com_content&view=article&id=1149:geopolymery
- [2] Alkalická aktivace mletého keramického střepu [online]. , 5 [cit. 2017-10-10]. Dostupné z: http://www.civilengineeringjournal.cz/archive/issues/2014/so_9-10/so_05_14_reznik.pdf
- [3] 30 Years of Successes and Failures in Geopolymer Applications. Market Trends and Potential Breakthroughs. [online]. 2002 [cit. 2017-10-10]. Dostupné z: https://www.geopolymer.org/fichiers_pdf/30YearsGEOP.pdf
- [4] Zeolit. *Wikipedie Otevřená encyklopedie* [online]. [cit. 2017-10-10]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Zeolit#Vlastnosti>
- [5] ŠKVÁRA, František. ALKALI ACTIVATED MATERIAL – GEOPOLYMER [online]. , 16 [cit. 2017-10-10]. Dostupné z: http://www.geopolymery.eu/aitom/upload/documents/publikace/2007/2007_praha_skvara.pdf
- [6] Geopolymery [online]. [cit. 2017-10-10]. Dostupné z: <http://tpm.fsv.cvut.cz/student/documents/files/CHS/CHS9.pdf>
- [7] Alkalicky aktivované materiály,geopolymery [online]. In: . [cit. 2017-10-10]. Dostupné z: http://old.vscht.cz/sil/pojiva/geo_2007.pdf
- [8] CIVIL ENGINEERING SEMINAR TOPICS: GEOPOLYMER CONCRETE. *CIVIL ENGINEERING SEMINAR TOPICS* [online]. Dostupné z: <http://civilenggseminar.blogspot.cz/2016/06/geopolymer-concrete.html>
- [9] Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development: a review [online]. In: . [cit. 2017-10-10]. Dostupné z: <http://docshare01.docshare.tips/files/3904/39046609.pdf>
- [10] Sypké stavební materiály. Sypké stavební materiály [online]. 2014 [cit. 2017-10-17]. Dostupné z: <http://www.dkl.cz/cz/kamenivo-a-palivo/sypke-stavebni-materialy/>
- [11] POJIVOVÉ VLASTNOSTI STRUSKY ZE SEKUNDÁRNÍ METALURGIE [online]. In: . 2006, s. 6 [cit. 2017-10-17]. Dostupné z: http://metal2014.tanger.cz/files/proceedings/metal_06/papers/145.pdf
- [12] Struska [online]. 2008 [cit. 2017-10-17]. Dostupné z: <http://www.strusky.cz/>
- [13] Popílek. In: SILO TRANSPORT, a.s. [online]. [cit. 2017-10-20]. Dostupné z: <http://www.silotransport.cz/popilek>

- [14] PŘEDPOKLADY VYUŽITÍ POPÍLKU PŘI ALKALICKE AKTIVACI [online]. , 6 [cit. 2017-10-20]. Dostupné z: http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/43/130/43130964.pdf
- [15] Popílek. Ebeton [online]. [cit. 2017-10-20]. Dostupné z: <http://www.ebeton.cz/pojmy/popilek>
- [16] Popílek. ČEZ ENERGETICKÉ PRODUKTY [online]. [cit. 2017-10-20]. Dostupné z: <http://www.cezep.cz/cs/vedlejsi-energeticke-produkty/popilek>
- [17] Metakaolin. Wwv.metakaolin.info [online]. [cit. 2017-10-27]. Dostupné z: <http://www.metakaolin.info/>
- [18] Benefits of Metakaolin in HPC. Concrete Bridge Views [online]. [cit. 2017-10-27]. Dostupné z: <http://www.hpcbridgeviews.com/i67/Article3.asp>
- [19] Metakaolin. Wikipedia, The Free Encyklopedia [online]. [cit. 2017-10-27]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Metakaolin>
- [20] Metakaolin - obecné informace. České lupkové závody, a.s. [online]. [cit. 2017-10-27]. Dostupné z: http://www.cluz.cz/cz/metakaoliny-obecne-informace?gclid=EAIaIQobChMImNP49-Oa1wIVyLvtCh33OwfUEAAYASAAEgLmyvD_BwE
- [21] Effect of curing temperature on the development of hard structure of metakaolin-based geopolymer - ScienceDirect. ScienceDirect.com | Science, health and medical journals, full text articles and books. [online]. Copyright © 2009 Elsevier Ltd. All rights reserved. [cit. 21.12.2017]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061809004346>
- [22] Development of metakaolin–fly ash based geopolymers for fire resistance applications. ScienceDirect[online]. 2014, , 8 [cit. 2017-10-27]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.techlib.cz/science/article/pii/S0950061814000646?via%3Dihub>
- [23] Bentonit. Wikipedie Otevřená encyklopedie [online]. [cit. 2017-12-28]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Bentonit>
- [24] Složení — CEG. Centrum experimentální geotechniky — CEG [online]. Copyright © 2014 ČVUT v Praze, Fakulta stavební, Centrum experimentální geotechniky, Thákurova 7, 166 29 Praha 6 [cit. 2017-10-31]. Dostupné z: <http://ceg.fsv.cvut.cz/vyzkum/bentonit/slozeni-1>
- [25] Využití — CEG. Centrum experimentální geotechniky — CEG [online]. Copyright © 2014. [cit. 2017-10-31]. Dostupné z: <http://ceg.fsv.cvut.cz/vyzkum/bentonit/vyuziti>

- [26] BENTONIT (AZTÉCKÁ HLÍNA). In: Ekokoza.cz - potřeby pro výrobu sýrů a domácí výrobu přírodní kosmetiky [online]. 2016 [cit. 2017-10-31]. Dostupné z: <https://eshop.ekokoza.cz/cs/bentonit-aztecka-hlina.html>
- [27] Alkali-activated fly ash-based geopolymers with zeolite or bentonite as additives - ScienceDirect. ScienceDirect.com | Science, health and medical journals, full text articles and books. [online]. Copyright © 2009 Elsevier Ltd. All rights reserved. [cit. 2017-10-31]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958946509001231?via%3Dihub>
- [28] KRENÍKOVÁ, Věr. Odpady a druhotné suroviny II [online]. In: . Univerzita Jana Evangelisty Purkyně Fakulta životního prostředí, 2014, 2014, s. 209 [cit. 2017-11-2]. Dostupné z: http://envimod.fzp.ujep.cz/sites/default/files/skripta/47e_final_tisk.pdf
- [29] Produkce odpadů v roce 2013 a nakládání s nimi :: Třetí Ruka. Třetí Ruka [online]. Copyright © 2013 CEMC Všechna práva vyhrazena. [cit. 2017-11-2]. Dostupné z: <http://www.tretiruka.cz/news/produkce-odpadu-v-roce-2013-a-nakladani-s-nimi/>
- [30] Cihelný recyklát | Cihlový recyklát. Cihlový recyklát [online]. Copyright © 2012 [cit. 2017-11-2]. Dostupné z: http://www.cihlovyrecyklat.cz/cihelny_recyklat.html
- [31] Valorization of brick waste by alkali-activation: A study on the possible use for masonry repointing - ScienceDirect. ScienceDirect.com | Science, health and medical journals, full text articles and books. [online]. Copyright © 2016 Elsevier Ltd and Techna Group S.r.l. All rights reserved. [cit. 2017-11-2]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0272884216309191>
- [32] Mechanical Properties of Geopolymer Composites Reinforced with Natural Fibers - ScienceDirect. ScienceDirect.com | Science, health and medical journals, full text articles and books. [online]. Copyright © 2016 The Author [cit. 2017-11-4]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705816317830>
- [33] SVOBODA A KOL., Luboš. Stavební hmoty. 3. Praha, 2013. ISBN 978-80-260-4972-2.
- [34] KATEDRA MATERIÁLOVÉHO INŽENÝRSTVÍ A CHEMIE. 123MAIN - Základní materiálové parametry - PDF. Představujeme Vám pohodlné a bezplatné nástroje pro publikování a sdílení informací. [online]. Copyright © DocPlayer.cz [cit. 2017-11-6]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/43924290-Katedra-materialoveho-inzenyrstvi-a-chemie-123main-zakladni-materialove-parametry.html>
- [35] Density Measurement Of Solids And Powders. Laboratory Equipment And Lab Products Marketplace - Labface [online]. Copyright © [cit. 2017-11-6]. Dostupné z: <https://labface.com/suppliers/Density-Measurement-1086>

- [36] ČERNÝ, Robert, ed. *Complex system of methods for directed design and assessment of functional properties of building materials: assessment and synthesis of analytical data and construction of the system*. Prague: Czech Technical University, 2010.
ISBN 978-80-01-04576-3
- [37] Pascal Series. *Pragolab* [online]. 2017 [cit. 2017-11-06]. Dostupné z: <https://www.pragolab.cz/analyza-povrchu/porozimetric/pascal-series>
- [38] VŠB, Zkoušení stavebních materiálů a výrobků - Malty. 301 Moved Permanently [online]. Copyright © GraFiKh design [cit. 28.12.2017]. Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~khe0007/opory/opory.php?stranka=malty_zk_tvrde
- [39] Normové zkoušky. In: Technopark Kralupy [online]. 2017 [cit. 2017-11-6]. Dostupné z: <https://www.technopark-kralupy.cz/zamereni/stavebni-materialy#/images/0!0/uzel/0013721/q0osMgIA.jpg>
- [40] CONSTRUMAT 2016 - K123-Katedra stavebních materiálů - Rodeo. Služba ukládání a zveřejňování dokumentů - doczz.cz [online]. Copyright © doczz.cz [cit. 2017-11-8]. Dostupné z: <http://doczz.cz/doc/28258/construmat-2016---k123-katedra-stavebn%C3%ADch-materi%C3%A1l%C5%AF>
- [41] Hydroxid sodný. Wikipedie Otevřená encyklopedie [online]. [cit. 2017-11-8]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Hydroxid_sodn%C3%BD
- [42] Hydroxid sodný. Učebnice chemie pro 8. ročník ZŠ [online]. [cit. 2017-11-8]. Dostupné z: <http://www.zschemie.euweb.cz/kyseliny/kyseliny24.html>
- [43] Vodní sklo. Wikipedie Otevřená encyklopedie [online]. [cit. 2017-11-15]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Vodn%C3%AD_sklo
- [44] ZÁKLADNÍ INFORMACE O VODNÍM SKLE | Vodní sklo a.s.. Vodní sklo a.s. [online]. Copyright © Vodní sklo, a.s. [cit. 2017-11-15]. Dostupné z: <http://www.vodnisklo.cz/cz/clanky/zakladni-informace-o-vodnim-skle>
- [45] Bezpečnostní list. In: Vodní sklo [online]. 7.7.2016, s. 9 [cit. 2017-11-15]. Dostupné z: http://www.vodnisklo.cz/data/pdf/bezpecnostni_listy/nove_bl/BL_Vodni_sklo_sodne_tekute_MP_pod_16.pdf
- [46] vody pro stavební účely. domů [online]. Copyright © 2017 Ekologická laboratoř PEAL [cit. 2017-11-15]. Dostupné z: <http://www.peallab.cz/vody-pro-stavebn%C3%AD-%C3%BA%C4%8Dely.html>
- [47] Záměšová voda do betonu | MůjBeton.cz. Beton pro ČR - Mujbeton.cz [online]. Dostupné z: <http://www.mujbeton.cz/zamesova-voda-do-betonu>

Seznam obrázků

Obr. 1: Výroba ohnivzdorných dřevotřískových desek [3].....	6
Obr. 2: Cihla vyrobená technologií L.T.G.S. [3].....	7
Obr. 3: Struktura zeolitů [4]	8
Obr. 4: Struktura geopolymery podle Davidovitse [5]	8
Obr. 5: Současný pohled na strukturu geopolymery [5]	8
Obr. 6: Definice geopolymery [6]	9
Obr. 7: ²⁷ Al NMR spektrum geopolymery [5]	9
Obr. 8: Struktura geopolymery podle Davidovitse [6]	10
Obr. 9: Proces geopolymery [8]	11
Obr. 10: Struska [10].....	14
Obr. 11: Zjednodušené chemické složení a potenciální fázové složení strusek [11]	14
Obr. 12: Popílek [13]	15
Obr. 13: Fáze přítomné v popílcích po spalování [14]	16
Obr. 14: Porovnání vývoje pevnosti v tlaku vzorků v závislosti na množství Na ₂ O [14] ...	16
Obr. 15: Metakaolin [18].....	17
Obr. 16: Vývoj mechanických vlastností geopolymerního materiálu vytvrzeného v čase [21].....	18
Obr. 17: Vliv doby vytvrzování na mechanické vlastnosti geopolymery vytvrzeného při zvýšených teplotách [21].....	19
Obr. 18: Vliv obsahu popílku na ohyb a pevnost v tlaku geopolymerní pasty [22].....	20
Obr. 19: Porovnání mechanických vlastností zkoumaných směsí [22]	21
Obr. 20: Bentonit [26].....	22
Obr. 21: Geopolymer obsahující bentonit [27].....	22
Obr. 22: Produkce odpadů v České Republice [29].....	23
Obr. 23: Cihelný recyklát [30].....	23
Obr. 24: Chemické složení cihelného prachu [31]	24
Obr. 25: Otevřená pórovitost jako funkce poměru SiO ₂ / Al ₂ O ₃ [31]	24
Obr. 26: Archimedovo vážení	26
Obr. 27: Héliový pyknometr [35]	27
Obr. 28: Rtuťový porozimetr [37]	28
Obr. 29: Tříbodová zkouška [39].....	29

Obr. 30: Granulometrie – distribuce částic – Hevlínský prach	33
Obr. 31: Granulometrie – kumulativní křivka částic – Hevlínský prach	34
Obr. 32: Granulometrie – distribuce částic – Libochovický prach	34
Obr. 33: Granulometrie – kumulativní křivka částic – Libochovický prach	35
Obr. 34: Hydroxid sodný ve formě pecek v p.a. kvalitě	35
Obr. 35: Krystalová mřížka hydroxidu sodného [41]	36
Obr. 36: Vodní sklo	37
Obr. 37: Objemová hmotnost- směsi typu A - Hevlín (po 28 dnech)	41
Obr. 38: Hustota pevné matrice - směsi typu A - Hevlín (po 28 dnech)	41
Obr. 39: Otevřená pórovitost - směsi typu A - Hevlín (po 28 dnech)	42
Obr. 40: Objemová hmotnost - směsi typu A - Libochovice (po 28 dnech)	44
Obr. 41: Hustota pevné matrice - směsi typu A - Libochovice (po 28 dnech)	44
Obr. 42: Otevřená pórovitost - směsi typu A - Libochovice (po 28 dnech)	45
Obr. 43: Objemová hmotnost - směsi typu B - Hevlín (po 28 dnech)	47
Obr. 44: Hustota pevné matrice - směsi typu B - Hevlín (po 28 dnech)	48
Obr. 45: Otevřená pórovitost - směsi typu B - Hevlín (po 28 dnech)	48
Obr. 46: Objemová hmotnost - směsi typu B - Libochovice (po 28 dnech)	51
Obr. 47: Hustota pevné matrice - směsi typu B - Libochovice (po 28 dnech)	51
Obr. 48: Otevřená pórovitost - směsi typu B - Libochovice (po 28 dnech)	52
Obr. 49: Měrný objem pórů - směsi typu A - Hevlín 20 °C	53
Obr. 50: Měrný objem pórů - směsi typu A - Hevlín 80 °C	54
Obr. 51: Přírůstkový objem pórů – směsi typu A – Hevlín 20 °C	54
Obr. 52: Přírůstkový objem pórů – směsi typu A – Hevlín 80 °C	55
Obr. 53: Specifický objem pórů - směsi typu B - Hevlín 20 °C	56
Obr. 54: Měrný objem pórů - směsi typu B - Hevlín 80 °C	56
Obr. 55: Přírůstkový objem pórů – směsi typu B – Hevlín 20 °C	57
Obr. 56: Přírůstkový objem pórů – směsi typu B – Hevlín 80 °C	57
Obr. 57: Pevnost v tlaku - směsi typu A - Hevlín (po 28 dnech)	61
Obr. 58: Pevnost v tahu za ohybu - směsi typu A - Hevlín (po 28 dnech)	61
Obr. 59: Pevnost v tlaku - směsi typu A - Libochovice (po 28 dnech)	64
Obr. 60: Pevnost v tahu za ohybu - směsi typu A - Libochovice (po 28 dnech)	64
Obr. 61: Pevnost v tlaku - směsi typu B - Hevlín (po 28 dnech)	67
Obr. 62: Pevnost v tahu za ohybu - směsi typu B - Hevlín (po 28 dnech)	67
Obr. 63: Pevnost v tlaku - směsi typu B - Libochovice (po 28 dnech)	69

Obr. 64: Pevnost v tahu za ohybu - směsi typu B - Libochovice (po 28 dnech).....	70
Obr. 65: Objemová hmotnost - porovnání hodnot materiálů 120 a 123	71
Obr. 66: Otevřená pórovitost - porovnání hodnot materiálů 120 a 123.....	72
Obr. 67: Pevnost v tlaku - porovnání hodnot materiálů 120 a 123.....	73
Obr. 68: Objemová hmotnost - porovnání hodnot materiálů 102 a 108	74
Obr. 69: Otevřená pórovitost - porovnání hodnot materiálů 102 a 108.....	75
Obr. 70: Pevnost v tlaku - porovnání hodnot materiálů 102 a 108.....	76

Seznam tabulek

Tab. 1: Složení směsí typu A.....	30
Tab. 2: Složení směsí typu B.....	31
Tab. 3: Mineralogické složení cihelného prachu - Hevlín	31
Tab. 4: Mineralogické složení cihelného prachu - Libochovice	32
Tab. 5: Chemické složení cihelného prachu - Hevlín	32
Tab. 6: Chemické složení cihelného prachu - Libochovice	33
Tab. 7: Základní fyzikální vlastnosti - referenční teplota - Hevlín.....	39
Tab. 8: Základní fyzikální vlastnosti - teplota ošetření 40 °C - Hevlín	39
Tab. 9: Základní fyzikální vlastnosti - teplota ošetření 60 °C - Hevlín	40
Tab. 10: Základní fyzikální vlastnosti - teplota ošetření 80 °C - Hevlín	40
Tab. 11: Základní fyzikální vlastnosti - referenční teplota - Libochovice.....	42
Tab. 12: Základní fyzikální vlastnosti - teplota ošetření 40 °C - Libochovice	42
Tab. 13: Základní fyzikální vlastnosti - teplota ošetření 60 °C - Libochovice	43
Tab. 14: Základní fyzikální vlastnosti - teplota ošetření 80 °C - Libochovice	43
Tab. 15: Základní fyzikální vlastnosti - referenční teplota - Hevlín.....	45
Tab. 16: Základní fyzikální vlastnosti - teplota ošetření 40 °C - Hevlín	46
Tab. 17: Základní fyzikální vlastnosti - teplota ošetření 60 °C - Hevlín	46
Tab. 18: Základní fyzikální vlastnosti - teplota ošetření 80 °C - Hevlín	46
Tab. 19: Základní fyzikální vlastnosti - referenční teplota - Libochovice.....	48
Tab. 20: Základní fyzikální vlastnosti - teplota ošetření 40 °C - Libochovice	49
Tab. 21: Základní fyzikální vlastnosti - teplota ošetření 60 °C - Libochovice	49
Tab. 22: Základní fyzikální vlastnosti - teplota ošetření 80 °C - Libochovice	49
Tab. 23: Mechanické vlastnosti - referenční teplota - Hevlín	59
Tab. 24: Mechanická vlastnosti – teplota ošetření 40 °C - Hevlín	59
Tab. 25: Mechanická vlastnosti – teplota ošetření 60 °C - Hevlín	60
Tab. 26: Mechanická vlastnosti – teplota ošetření 80 °C - Hevlín	60
Tab. 27: Mechanická vlastnosti - referenční teplota - Libochovice	62
Tab. 28: Mechanická vlastnosti – teplota ošetření 40 °C – Libochovice.....	62
Tab. 29: Mechanická vlastnosti – teplota ošetření 60 °C - Libochovice	62
Tab. 30: Mechanická vlastnosti – teplota ošetření 80 °C - Libochovice	63
Tab. 31: Mechanická vlastnosti - referenční teplota – Hevlín	65

Tab. 32: Mechanická vlastnosti – teplota ošetření 40 °C – Hevlín	65
Tab. 33: Mechanická vlastnosti – teplota ošetření 60 °C – Hevlín	65
Tab. 34: Mechanická vlastnosti – teplota ošetření 80 °C – Hevlín	66
Tab. 35: Mechanická vlastnosti - referenční teplota - Libochovice	68
Tab. 36: Mechanická vlastnosti – teplota ošetření 40 °C – Libochovice.....	68
Tab. 37: Mechanická vlastnosti – teplota ošetření 60 °C - Libochovice	68
Tab. 38: Mechanická vlastnosti – teplota ošetření 80 °C - Libochovice	69